



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería en Organización Industrial

**ESTUDIO Y ANÁLISIS DEL EFECTO SOBRE LAS
EMISIONES Y PARÁMETROS DEL TRÁFICO DE LA
IMPLANTACIÓN DE MEDIDAS RESTRICTIVAS EN EL
BARRIO DE LA RONDILLA**

Autor:

Martínez Sanz, Enrique

Tutelado por:

Pérez Rueda, María Ángeles

Pérez Blanco, Esteban

Valladolid, Diciembre 2020



AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero dar las gracias a mi tutora M^a Ángeles por estar pendiente durante todo el proceso de elaboración de este trabajo, por su trato y por la confianza que ha mostrado siempre en mí y en el buen resultado final del trabajo. También quiero agradecer a Esteban el haber despertado en mí el interés por la materia y por haberme dado la oportunidad de realizar un TFG relacionado con la misma.

Quiero dar las gracias a mis padres y a Mateo por haberme acompañado en este camino y haber confiado en mí desde el principio. También les doy las gracias por animarme cuando mi confianza flaqueaba y por entenderme cuando mi carácter no era el deseable.

Sin duda este proceso no habría sido igual sin mis amigas Laura, Sonsoles, Gloria y María. Gracias a vosotras también por haberme alegrado cada momento que hemos compartido en clase.

Quisiera recordar también a mis amigos Pablo, Miguel, Valera, Jesús y Luis por estar a mi lado y por preocuparse y animarme siempre que lo he necesitado a lo largo de toda la carrera.

Finalmente quiero dedicar este TFG a mis abuelas Adela y Moncha, cuyo cariño incondicional y ejemplo han supuesto el principal motor que me ha impulsado en la realización de este trabajo. Es para vosotras.





RESUMEN

El número de vehículos crece cada día y con él, las emisiones contaminantes que produce el tráfico afectando directamente a la calidad del aire y por lo tanto al medio ambiente y a la salud de las personas. Cada vez son más las ciudades que buscan medidas que tratan de minimizar este efecto nocivo que produce el tráfico.

Con este trabajo se pretende demostrar la importancia de hallar alguna medida efectiva. Para ello se han creado, simulado y analizado tres modelos que implementan algunas de las medidas más comunes de restricción de tráfico. Su análisis y posterior comparación han permitido demostrar hasta que punto pueden llegar a ser eficaces. El área de estudio analizada es el barrio de La Rondilla de Valladolid.

Para el desarrollo de este trabajo se ha empleado el software de simulación de tráfico Aimsun Next que permite crear y simular modelos de redes realistas y fiables.

PALABRAS CLAVE

Aimsun, Simulación, Tráfico, Emisiones, Modelo





ABSTRACT

The number of vehicles grows every day and with it, the polluting emissions produced by traffic directly affecting air quality and therefore the environment and people's health. More and more cities are looking for measures that try to minimize this harmful effect caused by traffic.

This project aims to demonstrate the importance of finding some effective measure. For this, three models have been created, simulated and analyzed that implement some of the most common traffic restriction measures. Their analysis and subsequent comparison have shown to what extent they can be effective. The study area analyzed is "La Rondilla" neighborhood of Valladolid.

For the development of this work, the traffic simulation software Aimsun Next has been used, which allows creating and simulating realistic and reliable network models.

KEY WORDS

Aimsun, Simulation, Traffic, Emissions, Model



INDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN.....	17
1.1 Introducción.....	18
1.2. Objetivos.....	19
1.3 Organización de la memoria.....	20
CAPÍTULO 2 INGENIERÍA DE TRÁFICO.....	21
2.1 Conceptos generales de la Ingeniería de Tráfico.....	22
2.1.1 Introducción a la Ingeniería de tráfico.....	22
2.1.2 Planificación vial.....	24
2.1.2.1 Recogida y análisis de datos.....	24
2.1.2.2 Planificación de las vías y el transporte.....	25
2.1.2.3 Trazado vial.....	26
2.1.3 Organización de la Ingeniería de Tráfico.....	26
2.1.4 Conclusiones sobre la Ingeniería de Tráfico.....	28
2.2 Características técnicas del tráfico.....	29
2.2.1 Intensidad del tráfico.....	29
2.2.2 Composición del tráfico.....	31
2.2.3 Velocidad.....	32
2.2.4 Densidad de tráfico.....	33
2.3 Relación entre las características técnicas del tráfico.....	34
2.3.1 Intensidad y velocidad.....	34
2.3.2 Velocidad y densidad.....	35
2.3.3 Intensidad y densidad.....	36
2.4 Capacidad y nivel de servicio.....	37
2.4.1 Capacidad.....	37
2.4.2 Niveles de servicio.....	40
2.5 Intersecciones.....	43
2.5.1 Intersecciones convencionales a nivel.....	44
2.5.2 Intersecciones semafóricas.....	46
2.5.3 Intersecciones giratorias o glorietas.....	50
2.6 Control del tráfico rodado.....	51
2.6.1 Conceptos y objetivos del control.....	51
2.6.2 Canalización.....	52



2.6.3 Comunicación y transmisión de información.....	53
2.6.4 Límites y controles de velocidad	53
2.7 Estudio del transporte mediante aforos.....	55
2.7.1 Objetivo de los aforos	55
2.7.2 Tipos de aforos	56
2.7.3 Aforos en zonas urbanas	57
2.8 Planificación del transporte y de los costes.....	58
2.8.1 Etapas de la planificación	59
2.8.2 Planificación de los costes.....	60
2.8.2.1 Estimar los costes	60
2.8.2.2 Determinar el presupuesto	60
2.8.2.3 Controlar los costes	61
2.8.2.4 Costes de capital y costes de operación.....	62
2.8.2.5 Costes fijos y costes variables	63
2.9 Clasificación funcional de las vías urbanas	63
2.10 Movilidad urbana y movilidad peatonal	65
2.10.1 Introducción a la movilidad urbana	65
2.10.2 Nivel de servicio del tráfico peatonal.....	66
2.10.3 Características de los peatones.....	67
2.10.4 Clasificación funcional de las vías peatonales.....	69
CAPÍTULO 3 EMISIONES CONTAMINANTES	71
3.1 Introducción.....	72
3.2 Gases producidos por los vehículos.....	73
3.2.1 Tipos de gases	73
3.2.2 Tipos de combustión	75
3.3 Efectos de los gases contaminantes	76
3.3.1 Efectos sobre el medio ambiente	76
3.3.2 Efectos sobre la salud de las personas.....	80
3.4 Normativa sobre calidad del aire	81
3.4.1 Normativa europea	81
3.4.2 Normativa española	82
3.5 Normativa europea sobre emisiones de vehículos: EURO	85
3.5.1 Introducción a la norma EURO	85



3.5.2 Evolución de la norma EURO.....	85
3.5.3 EURO 6.....	86
3.6 Normativa española sobre emisiones de vehículos	87
3.6.1 Legislación sobre vehículos ligeros	87
3.6.2 Legislación sobre vehículos pesados.....	88
3.7 Clasificación vehicular en función de sus emisiones de CO ₂	89
3.7.1 Introducción a los distintivos de la Dirección General de Tráfico (DGT)	89
3.7.2 Etiquetas de la DGT	89
3.7.3 El vehículo eléctrico como alternativa	91
3.8 Medidas tomadas por otras ciudades	93
CAPÍTULO 4 SIMULACIÓN Y ANALISIS DE LOS MODELOS	101
4.1 Caracterización del área de estudio	102
4.1.1 Caracterización geográfica	102
4.1.2 Caracterización del tráfico	105
4.2 Descripción del modelo Panis et al (2006)	107
4.2.1 Introducción al modelo	107
4.2.2 Antecedentes	108
4.2.3 Metodología	109
4.2.3.1 Modelo de microsimulación DRACULA	110
4.2.3.2 Mediciones y modelado del nuevo modelo de emisiones.....	113
4.2.3.3 Integración de los modelos de tráfico y emisiones.....	117
4.2.3.4 Lista de notaciones utilizada	118
4.2.4 Implementación del modelo Panis et al (2006) en Aimsun Next	119
4.2.4.1 Parámetros de entrada.....	119
4.2.4.2 Parámetros de salida	120
4.3 Pasos previos a la simulación.....	121
4.3.1 Tipo de modelo y creación de la red.....	121
4.3.2 Datos de demanda	122
4.3.3 Cálculo de emisiones.....	123
4.4 Análisis de la movilidad en Valladolid y La Rondilla	125
4.5 Simulación, análisis y comparación de los modelos.....	128
4.5.1 Modelo 1: Sin restricciones	128
4.5.1.1 Caracterización del tráfico: Parámetros globales.....	129

4.5.1.2 Estudio de las emisiones	136
4.5.2 Modelo 2: Limitación a 30 Km/h	141
4.5.2.1 Estudio de las emisiones	143
4.5.2.2 Análisis de los parámetros globales del tráfico	148
4.5.3 Modelo 3: Restricción del tráfico por matrículas.....	150
4.5.3.1 Estudio de las emisiones	151
4.5.3.2 Análisis parámetros globales del tráfico	156
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES	159
5.1 Conclusiones del trabajo.....	160
5.2 Líneas futuras de investigación.....	161
CAPÍTULO 6 BIBLIOGRAFÍA	163
ANEXO 1 GUÍA DE USO DE AIMSUN	167
A1.1 Introducción al software	168
A1.2 Tipos de simulación con Aimsun Next.....	169
A1.3 Instrucciones de uso y herramientas más usadas.....	169
A1.3.1 Creación de secciones.....	169
A1.3.2 Stops, ceda el paso y señalización semafórica	171
A1.3.3 Asignación del tráfico.....	172
A1.3.4 Demandas de tráfico para redes con matrices	176
A1.3.5 Preparación de la ejecución de la simulación.....	177
A1.3.6 Ejecución de la simulación y obtención de resultados	179
A1.3.6.1 Tipos de ejecuciones	179
A1.3.6.2 Sumario de resultados y series temporales	180
A1.3.6.3 Modos de vista	182
A1.3.6.5 Exportación de vistas	183
A1.3.7 Características medioambientales.....	184



INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 2.3-1 Relación Intensidad-Velocidad.	35
Ilustración 2.3-2 Relación Velocidad-Densidad.	36
Ilustración 2.3-3 Relación Intensidad-Densidad. Fuente:.....	37
Ilustración 2.4-1 Capacidad máxima de un carril.	40
Ilustración 2.4-2 Estado de las vías en los diferentes niveles de servicio.	42
Ilustración 2.4-3 Niveles de servicio de las vías.....	43
Ilustración 2.5-1 Tipos de intersecciones.	45
Ilustración 2.5-2 Distancia mínima de visibilidad en intersección en T.....	46
Ilustración 2.8-1 Línea base de costes.	61
Ilustración 2.8-2 Representación gráfica de los costes de un proyecto.....	61
Ilustración 2.9-1 Autopista.....	65
Ilustración 2.9-2 Vía arterial	65
Ilustración 2.9-4 Vía local.....	65
Ilustración 2.9-3 Vía colectora	65
Ilustración 2.10-1 Ancho útil.....	67
Ilustración 3.2-1 Gases emitidos por los vehículos en función del combustible.....	74
Ilustración 3.3-1 Representación gráfica del efecto invernadero.	77
Ilustración 3.3-2 Evolución de las emisiones emitidas por cada sector en la UE.	78
Ilustración 3.3-3 Porcentaje de emisiones emitido por cada tipo de transporte.	79
Ilustración 3.7-1 Etiqueta distintiva “0 emisiones”.	89
Ilustración 3.7-2 Etiqueta distintiva “ECO”.	90
Ilustración 3.7-3 Etiqueta distintiva “C”.	90
Ilustración 3.7-4 Etiqueta distintiva “B”.	91
Ilustración 3.7-5 Ciclo de vida de las emisiones de CO ₂ para distintos tipos de vehículos y combustibles.	92
Ilustración 3.8-1 Área geográfica de Madrid Central.	94
Ilustración 3.8-2 Área geográfica de ZBE Rondas de Barcelona.....	95
Ilustración 3.8-3 Área geográfica de la tasa de congestión de Londres.....	96
Ilustración 3.8-4 Supermanzanas de Vitoria-Gasteiz.....	98
Ilustración 4.1-1 Mapa de barrios de Valladolid.....	102
Ilustración 4.1-2 Vista aérea de La Rondilla.....	103
Ilustración 4.2-1 Metodología de Panis et al (2006).....	109

Ilustración 4.2-2 Interfaz del modelo Panis et al (2006) en Aimsun Next.	120
Ilustración 4.2-3 Sumario de resultados emisiones.	120
Ilustración 4.3-1 Representación La Rondilla en Aimsun Next.	121
Ilustración 4.3-2 Accesos al barrio de La Rondilla.	122
Ilustración 4.3-3 Selección del modelo de emisiones en Aimsun Next.	124
Ilustración 4.4-1 Mapa barrios de Valladolid.	126
Ilustración 4.4-2 Desplazamientos según medio de transporte y franja horaria.	126
Ilustración 4.4-3 Viajes atraídos y generados por los barrios de Valladolid.	127
Ilustración 4.4-4 Mapa de generación de viajes por barrios.	128
Ilustración 4.5-1 Mapa de flujo a las 14:15 La Rondilla.	130
Ilustración 4.5-2 Mapa de color de emisiones de CO ₂ en La Rondilla a las 14:15 Modelo 1.	137
Ilustración 4.5-3 Mapa de color de emisiones de CO ₂ en La Rondilla a las 14:15 Modelo 2.	143
Ilustración 4.5-4 Mapa de color de emisiones de CO ₂ en La Rondilla a las 14:15 Modelo 3.	151
Ilustración A1.3-1 Creación de secciones.	170
Ilustración A1.3-2 Unión de secciones.	170
Ilustración A1.3-3 Modificación de secciones.	171
Ilustración A1.3-4 Gestión de Intersecciones.	171
Ilustración A1.3-5 Creación de grupos semafóricos.	172
Ilustración A1.3-6 Creación de nodos.	173
Ilustración A1.3-7 Creación de matrices.	173
Ilustración A1.3-8 Modificación matrices.	174
Ilustración A1.3-9 Celdas de las matrices.	174
Ilustración A1.3-10 Creación de rutas.	175
Ilustración A1.3-11 Reparto del tráfico por rutas.	176
Ilustración A1.3-12 Ejemplo reparto del tráfico por rutas.	176
Ilustración A1.3-13 Creación demandas de tráfico.	177
Ilustración A1.3-14 Creación escenarios dinámicos.	178
Ilustración A1.3-15 Tipos de ejecuciones y restauración de datos.	179
Ilustración A1.3-16 Captura de simulación animada.	180
Ilustración A1.3-17 Sumario de resultados.	180
Ilustración A1.3-19 Series temporales 2.	181



Ilustración A1.3-18 Series temporales 1.....	181
Ilustración A1.3-20 Resultados a generar.....	181
Ilustración A1.3-21 Creación modos de vista.	182
Ilustración A1.3-22 Ejemplo de modo de vista.....	183
Ilustración A1.3-23 Creación diseño de impresión.....	183
Ilustración A1.3-24 Exportar modo de vista a PDF.	184
Ilustración A1.3-25 Composición de flota.....	185
Ilustración A1.3-26 Modelos medioambientales.....	185

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.2-1 Resumen de los modelos.....	19
Tabla 2.4-1 Valores de los factores E_T y E_B	40
Tabla 2.5-1 Radios mínimos de giro en bordillo interior de intersecciones a nivel para los movimientos permitidos	45
Tabla 2.5-2 Distancias mínimas de visibilidad de parada en intersecciones.....	46
Tabla 2.5-3 Tipo de progresión en función del valor del factor de progresión R_c	48
Tabla 3.3-1 Valores recomendados por la OMS para los principales contaminantes del transporte	81
Tabla 3.4-1 Valores objetivo del arsénico, níquel, cadmio y benzeno(a) pireno	82
Tabla 3.4-2 Valores límite para la protección de la salud humana según el Real Decreto 102/2011.....	83
Tabla 3.4-3 Umbrales de evaluación para el SO_2	83
Tabla 3.4-4 Umbrales de evaluación para el NO_2 y los NO_x	83
Tabla 3.4-5 Umbrales de evaluación para las PM_{10} y las $PM_{2,5}$	84
Tabla 3.4-6 Umbrales de evaluación para el CO	84
Tabla 3.4-7 Puntos de muestreo necesarios en función de la población.....	84
Tabla 3.6-1 Valores límite de emisión para vehículos ligeros establecidos en la norma EURO 5	88
Tabla 3.6-2 Valores límite de emisión para vehículos ligeros establecidos por la norma EURO 6.....	88
Tabla 3.6-3 Valores límite de emisión para vehículos pesados establecidos por la norma EURO 6.....	88
Tabla 3.8-1 Datos recogidos por las estaciones de Valladolid en Julio de 2019	99
Tabla 4.1-1 Distribución desplazamientos por franjas horarias	105
Tabla 4.1-2 Lugar de aparcamiento tras un desplazamiento	106
Tabla 4.2-1 Vehículos utilizados para la elaboración del modelo	114
Tabla 4.2-2 Valor de los factores en función del gas y del tipo de vehículo.	115
Tabla 4.3-1 Valor de los factores en función del gas y del tipo de vehículo.	124
Tabla 4.4-1 Medio empleado para los desplazamientos en Valladolid.....	125
Tabla 4.4-2 Población y motorización barrios similares a La Rondilla.....	125
Tabla 4.5-1 Datos de Flujo Modelo 1.....	129
Tabla 4.5-2 Datos de densidad Modelo 1	131
Tabla 4.5-3 Datos Velocidad Modelo 1.....	132
Tabla 4.5-4 Datos vehículos entrantes Modelo 1	133



Tabla 4.5-5 Datos vehículos dentro Modelo 2.....	133
Tabla 4.5-6 Datos tiempo de viaje Modelo 1.....	134
Tabla 4.5-7 Datos tiempo de demora Modelo 1.....	134
Tabla 4.5-9 Datos número de paradas Modelo 1	135
Tabla 4.5-8 Datos tiempo de parada Modelo 1	135
Tabla 4.5-10 Otros parámetros de interés Modelo 1	135
Tabla 4.5-11 Parámetros del tráfico por calles Modelo 1	136
Tabla 4.5-12 Datos de emisiones de CO ₂ Modelo 1.....	138
Tabla 4.5-13 Datos emisiones NO _x Modelo 1.....	139
Tabla 4.5-14 Datos emisiones PM Modelo 1	140
Tabla 4.5-15 Emisiones por calles Modelo 1	141
Tabla 4.5-16 Datos comparativos emisiones CO ₂ Modelo 1 y Modelo 2	144
Tabla 4.5-17 Datos comparativos emisiones NO _x Modelo 1 y Modelo 2	145
Tabla 4.5-18 Datos comparativos emisiones PM Modelo 1 y Modelo 2.....	146
Tabla 4.5-19 Tabla comparativa emisiones por calles Modelo 1 y Modelo 2	147
Tabla 4.5-20 Comparativa parámetros globales de tráfico Modelo 1 y Modelo 2 ..	149
Tabla 4.5-21 Comparativa otros parámetros de interés Modelo 1 y Modelo 2.....	149
Tabla 4.5-22 Comparativa datos emisiones CO ₂ Modelo 1 y Modelo 3.....	152
Tabla 4.5-23 Comparativa datos emisiones NO _x Modelo 1 y Modelo 3	153
Tabla 4.5-24 Comparativa datos emisiones PM Modelo 1 y Modelo 3	154
Tabla 4.5-25 Comparativa emisiones por calles Modelo 1 y Modelo 3	155
Tabla 4.5-26 Comparativa parámetros globales de tráfico Modelo 1 y Modelo 3 ..	156
Tabla 4.5-27 Comparativa otros datos de interés Modelo 1 y Modelo 3	157

INDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 4.1-1 Viajes según hora de comienzo.	106
Gráfico 4.2-1 Comparativa realidad con modelo.....	116
Gráfico 4.2-2 Comparativa resultados obtenidos con modelos ya validados.	117
Gráfico 4.5-1 Flujo Modelo 1.	129
Gráfico 4.5-2 Densidad Modelo 1.	131
Gráfico 4.5-3 Velocidad Modelo 1.	132
Gráfico 4.5-4 Vehículos entrantes y vehículos dentro Modelo 1.	133
Gráfico 4.5-5 Tiempo de viaje y de demora Modelo 1.	134
Gráfico 4.5-6 Tiempo de parada y número de paradas Modelo 1.	135
Gráfico 4.5-7 Emisiones CO ₂ Modelo 1.....	138
Gráfico 4.5-8 Emisiones NO _x Modelo 1.....	139
Gráfico 4.5-9 Emisiones PM Modelo 1.	140
Gráfico 4.5-10 Comparativa emisiones CO ₂ Modelo 1 y Modelo 2.	144
Gráfico 4.5-11 Comparativa emisiones NO _x Modelo 1 y Modelo 2.	145
Gráfico 4.5-12 Comparativa emisiones PM Modelo 1 y Modelo 2.	146
Gráfico 4.5-13 Comparativa emisiones CO ₂ Modelo 1 y Modelo 3.....	152
Gráfico 4.5-14 Comparativa emisiones NO _x Modelo 1 y Modelo 3.....	153
Gráfico 4.5-15 Comparativa emisiones PM Modelo 1 y Modelo 3.	154

INDICE DE ECUACIONES

Ecuación 2.2-1 Intensidad máxima horaria	30
Ecuación 2.2-2 Factor de hora punta.....	31
Ecuación 2.2-3 Factor de hora punta con intervalos de 15 minutos.....	31
Ecuación 2.2-4 Velocidad media espacial	32
Ecuación 2.2-5 Velocidad media temporal	32
Ecuación 2.2-6 Densidad de tráfico	33
Ecuación 2.3-1 Relación de las variables fundamentales del tráfico.....	34
Ecuación 2.4-1 Capacidad de la vía.....	39
Ecuación 2.4-2 Factor de camiones en circulación.....	39
Ecuación 2.4-3 Factor de autobuses en circulación.....	39
Ecuación 2.5-1 Ola verde	47
Ecuación 2.5-2 Factor de calidad de progresión.....	47
Ecuación 2.5-3 Capacidad de entrada por cada ramal a una glorieta	50
Ecuación 2.8-1 Determinación de los costes de un proyecto por tres valores	60
Ecuación 3.2-1 Combustión completa	75
Ecuación 3.2-2 Combustión incompleta	76
Ecuación 4.2-1 Respuesta del vehículo siguiente	111
Ecuación 4.2-2 aceleración del vehículo de seguimiento.....	112
Ecuación 4.2-3 Velocidad del vehículo n tras un tiempo de reacción τ	112
Ecuación 4.2-4 Aceleración del vehículo n tras un tiempo de reacción τ	112
Ecuación 4.2-5 Cantidad de gas emitido por un vehículo	114
Ecuación 4.5-1 Tiempo de demora	133





CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

Actualmente los problemas medioambientales generan cada vez más interés y preocupación y están cada vez más presentes en los medios de comunicación y en el discurso de políticos, activistas y personalidades con relevancia mundial. La población mundial crece cada día y con ella lo hace el parque de vehículos de cada país, esto genera no solo un problema de espacio en las ciudades para el estacionamiento de dichos vehículos y su circulación, sino que, genera cantidades elevadas de gases contaminantes que se emiten libremente a la atmósfera y que tienen efectos inmediatos en el medio ambiente y en la salud de las personas que respiran ese aire.

Es por tanto que actualmente el tráfico es considerado como uno de los principales causantes de los fenómenos medioambientales que se viven hoy en día y por tanto los gobiernos de todos los países están elaborando medidas que pretenden minimizar el efecto del tráfico rodado. Sin embargo, los criterios lejos de ser únicos son muy dispares y por lo tanto las medidas que se toman son cambiantes, muy diferentes y con resultados dispares.

Los órganos de gobierno que alrededor del mundo más están trabajando en la búsqueda de soluciones y que más se implican en la elaboración e implantación de diferentes modelos de tráfico son los ayuntamientos de las ciudades. Basta con escuchar un día las noticias para percibir como los ayuntamientos no cesan en su interés de mejorar la calidad del aire de sus ciudades y ello pasa por buscar fórmulas que reduzcan el impacto que el tráfico genera.

En España hay ciudades que son pioneras en la elaboración de modelos de tráfico y urbanísticos que han demostrado su eficacia y que más tarde han sido exportados al resto del mundo. Ciudades como Madrid o Vitoria han implantado modelos restrictivos en los centros de sus ciudades y han conseguido adaptarse a ellos. Pero, si anteriormente se comentaba que las medidas que se implantan en ciudades alrededor del mundo son muy diferentes, España no es la excepción y a lo largo de toda su geografía pueden encontrarse medidas diferentes pero que tienen algo en común: Minimizar el impacto de las emisiones de gases a través de restricciones al tráfico.

En Valladolid uno de los barrios con mayores problemas de tráfico es La Rondilla ya que es un área muy poblada de la ciudad y diseñada hace muchos años cuando la presencia de vehículos en las ciudades no era tan grande, por lo tanto, es un barrio con muchos vehículos, mucho tráfico y poco espacio. Este hecho ha motivado al autor y tutores de este proyecto a llevar a cabo un análisis del tráfico en esta área y a tratar de buscar soluciones que permitan que la calidad de vida de los vecinos de La Rondilla mejore.

Por todo lo anteriormente descrito se hace imprescindible encontrar medidas que sean de fácil implantación, que consigan minimizar las emisiones del tráfico y que no supongan un gran perjuicio a los vecinos de las ciudades que se vean afectados por ellas.

1.2. Objetivos

El Ayuntamiento de Valladolid ha implantado diferentes medidas a lo largo de los últimos años como consecuencia de episodios de niveles de calidad del aire por encima de los permitidos debido a las emisiones producidas por los vehículos que circulan por sus calles. El Ayuntamiento sigue buscando la medida que garantice unos niveles de emisiones tolerables y que no afecten demasiado a la calidad del aire.

Los objetivos que se persiguen con el presente proyecto son muchos, pero se podrían agrupar en tres principales que son los siguientes:

- Llevar a cabo un profundo análisis de las emisiones contaminantes producidas por los vehículos que transitan por las calles de La Rondilla y sus efectos sobre el medio ambiente y la salud de las personas. Como paso previo a ese análisis se desea profundizar en el aspecto teórico de la Ingeniería de tráfico para conseguir llevar a cabo una descripción completa y concisa del estado actual del tráfico en Europa, España y por supuesto Valladolid.
- Adquirir la destreza suficiente con el uso del software Aimsun Next para poder generar simulaciones realistas y válidas y elaborar un manual de uso del programa que pueda servir de utilidad a cualquier persona que desee trabajar con él.
- Simular, analizar y demostrar la eficacia de la implantación de medidas restrictivas que actualmente se utilizan en muchas ciudades de España y proponer, si fuese necesario, su implantación en Valladolid con las mayores garantías de eficacia posibles.

Para demostrar la eficacia que dichas medidas pueden tener lo que se hace en este proyecto es generar tres modelos sobre la misma red, pero con medidas distintas que además permitan su comparación y de este modo faciliten la decisión de si es conveniente implantar alguna de ellas o no.

A continuación, se describen brevemente los tres modelos que se simulan y analizan en el presente proyecto:

MODELOS GENERADOS, SIMULADOS Y ESTUDIADOS EN EL PROYECTO		
MODELO	DESCRIPCIÓN	IMPLANTACIÓN
MODELO 1 Estado Actual	Simulación del estado actual del barrio de La Rondilla	Estado actual sin restricciones
MODELO 2 Limitación de Velocidad	Limitación a 30 Km/h en todas las calles de La Rondilla	Se ha implantado ocasionalmente en Valladolid
MODELO 3 Restricción de Circulación	Restricción de la circulación en función del número de matrícula	Nunca se ha implantado en Valladolid

Tabla 1.2-1 Resumen de los modelos. Fuente: Elaboración propia

Tanto el Modelo 2 como el Modelo 3, posteriormente de su simulación y análisis individual, han sido comparados con el Modelo 1 con el objetivo de comprobar hasta que punto son eficaces y como varían tanto los parámetros globales de tráfico como la emisión de gases con su implantación.

1.3 Organización de la memoria

La presente memoria trata de reflejar de la manera más descriptiva y veraz posible los resultados obtenidos en la realización de este Trabajo de Fin de Grado.

La estructuración que se ha seguido está compuesta de 6 capítulos y un Anexo.

-Capítulos

- Capítulo 1 “Introducción”: Introduce el tema tratado y establece los objetivos perseguidos con la realización del TFG.
- Capítulo 2 “Ingeniería de Tráfico”: Se describen los aspectos teóricos y técnicos que es necesario entender antes de llevar a cabo las simulaciones.
- Capítulo 3 “Emisiones de tráfico”: Se describen teóricamente cuáles son las principales emisiones de los vehículos, qué efectos producen y cuál es la legislación vigente que las controla.
- Capítulo 4 “Simulación de los modelos”: Se caracteriza la zona de estudio, se describe el modelo matemático que emplea el software para el cálculo de las emisiones y finalmente se simulan, estudian y comparan los tres modelos planteados.
- Capítulo 5 “Conclusiones y líneas futuras”: Se exponen las conclusiones a las que se ha llegado tras el análisis de los resultados obtenidos y se proponen futuras líneas de investigación.
- Capítulo 6 “Bibliografía”: Se citan todas las fuentes y referencias que se han consultado a lo largo de la elaboración del proyecto.

-Anexos:

Anexo 1 “Guía de uso de Aimsun Next”: Se introduce el software utilizado para la realización del proyecto y se describen los pasos fundamentales para crear una red de tráfico funcional con la que trabajar.



CAPÍTULO 2

INGENIERÍA DE

TRÁFICO

2.1 Conceptos generales de la Ingeniería de Tráfico

En este apartado se van a introducir los aspectos más relevantes de la ingeniería de tráfico que van a ser imprescindibles para entender y describir los posteriores modelos que se generan en este trabajo.

2.1.1 Introducción a la Ingeniería de tráfico

El hecho de que la sociedad haya evolucionado y haya ido aumentando poco a poco su complejidad ha contribuido a incrementar la necesidad de unir y permitir el tránsito entre las distintas actividades que se llevan a cabo en lugares alejados en busca de una utilidad o beneficio. La búsqueda del éxito a la hora de satisfacer esta necesidad de conexión es y será uno de los principales factores que determinen el nivel de vida de todas las ciudades del mundo.

Si una determinada área geográfica desea crecer y prosperar, ello será imposible si no se proyecta, se desarrolla y se conserva correctamente un sistema con la capacidad suficiente para que tanto el transporte público como el privado pueda circular y que permita la conexión entre todos los puntos de dicha área geográfica.

Dicha creación de infraestructuras para garantizar la movilidad determina un factor social puesto que allá donde se cree esta infraestructura esta influirá en su entorno y dará lugar a que muchas personas se vean favorecidas, pero también otras muchas se verán perjudicadas lo que dará lugar a grupos de presión que velarán por sus propios intereses.

Por lo tanto, la movilidad en las ciudades representa un factor suficientemente importante como para que existan personas encargadas de su gestión. Cabe destacar que existen dos funciones principales de la movilidad:

- Utilidad de lugar: Llegar a un determinado destino. Aspecto importante en el transporte de pasajeros.
- Utilidad de tiempo: Llegar a un destino en un determinado momento. Aspecto más importante en el caso del transporte de mercancías.

Es por todo esto que existe una rama de la Ingeniería Civil denominada Ingeniería del tráfico que se encargará de la planificación, diseño, operación y control del tráfico en todo tipo de vías, así como de sus redes, infraestructuras y de la interacción que dicho tráfico pueda tener con todo aquello que le rodea y a lo cual afecta y condiciona. Según el Instituto of Traffic Engineering la Ingeniería de tráfico se conoce como: “Rama de la Ingeniería que trata el planeamiento de calles, carreteras, zonas anexas a ellas, del proyecto de sus características geométricas y de la circulación del tráfico en las mismas en vista a su utilización para el transporte de personas y mercancías de la forma más segura, eficiente y cómoda”.

Los ingenieros de tráfico se encargan de mejorar la seguridad y la capacidad en las calles y carreteras, sin embargo, sus funciones en algunas ocasiones se han visto

representadas también por la Policía. Esta ambigüedad a la hora de repartir funciones entre ingenieros y cuerpos de policía ha llevado en ocasiones a ciertas dificultades e incluso disputas por determinar a quién le correspondían ciertas atribuciones y responsabilidades.

Sin embargo, a partir de los años 50 del siglo XX el tráfico se fue tratando con unos criterios más técnicos propios de la ingeniería lo que desembocaría en la creación de una rama propia dentro de la Ingeniería que es la ya citada Ingeniería de tráfico.

Como se deduce de la definición dada por el Instituto of Traffic Engineering de Estados Unidos el objetivo principal de los Ingenieros de tráfico es el de resolver problemas relacionados con el tráfico que garanticen el bienestar de las personas y la convivencia pacífica en las ciudades. Esto hace que ellos sean los encargados tanto de la solución de problemas locales sencillos como la elaboración de complejas redes y planes de transporte con alcance internacional.

Otro aspecto muy importante a tener en cuenta es que el Ingeniero de tráfico no solo se ha de encargar del estudio y control del transporte rodado, sino que ha de garantizar también la seguridad para los peatones ya que estos interaccionan directamente con dicho tráfico rodado. Por lo tanto, el estudio y el diseño de las vías para que los peatones circulen por las ciudades, así como, garantizar su seguridad son funciones importantes dentro del campo de actuación del Ingeniero de tráfico.

Una vez conocidos tanto el concepto como los objetivos de la ingeniería de tráfico es preciso determinar cuáles son las actividades que desarrolla esta rama de la Ingeniería. Sus funciones más destacadas se pueden clasificar en dos grandes grupos:

- **Planificación del tráfico:** Surge de la Planificación Urbana que hace referencia al conjunto de instrumentos técnicos y normativos relativos a ordenar el uso del suelo y regular su posterior transformación. Esto hace que el Planeamiento del tráfico esté cerca de disciplinas como el urbanismo, las matemáticas o la economía. La Planificación del Tráfico es, por tanto, una rama esencial a incluir dentro de los planes de desarrollo de crecimiento de las ciudades. Herramientas informáticas como la utilizada en el presente proyecto (Aimsun Next) facilitan enormemente la elaboración de dichos planes de desarrollo.
- **Ordenación de la circulación:** Mientras que la Planificación del Tráfico se encarga de acciones a largo plazo, la Ordenación de la Circulación lleva a cabo actuaciones de carácter más inmediato. Esta rama de la Ingeniería de tráfico se encarga de aumentar al máximo el aprovechamiento de las vías, la seguridad y la fluidez de circulación actuando directamente sobre las corrientes circulatorias sin necesidad de modificar físicamente la estructura de las redes.

2.1.2 Planificación vial

A la hora de llevar a cabo un proyecto de planificación vial es imprescindible tratar el tráfico como un factor básico en dicha planificación puesto que como se ha comentado anteriormente uno de los principales objetivos es garantizar la eficacia de la circulación por las diferentes vías.

Es por tanto que en todos aquellos trabajos en los que se lleven a cabo actividades de Planificación vial y de infraestructuras, la Ingeniería de Tráfico ha de jugar un papel importante. A continuación, se detallan algunas de las actividades que el Ingeniero de tráfico tendrá que llevar a cabo en el proceso de Planificación vial.

2.1.2.1 Recogida y análisis de datos

Como en cualquier problema de diferente índole el primer paso a la hora de abordarlo es analizarlo técnica y objetivamente. Desde el punto de vista de la Ingeniería es imprescindible actuar bajo la objetividad que te otorgan los datos y no únicamente sobre hipótesis que, aunque puedan ayudarnos a valorar diferentes perspectivas de actuación, no constituyen un elemento firme sobre el que sustentar el análisis de un problema.

Es por tanto que la obtención de datos es imprescindible para posteriormente analizarlos y ponderarlos. Aunque la recogida de datos en la Ingeniería de Tráfico en ocasiones pueda ser llevado a cabo por cualquier persona debido a que en algunas ocasiones resulta verdaderamente sencilla, se han elaborado procedimientos debidamente estudiados y calibrados que permitan llegar a conclusiones y tomar decisiones adecuadas.

Sin embargo, desde el punto de vista del Ingeniero encargado de llevar a cabo dicha recogida y análisis de datos es importante tener en cuenta algunos aspectos. El primero es que la cantidad de datos ha de ser proporcionada y acorde con las necesidades de la planificación, puesto que la obtención de una excesiva cantidad de datos supondría, además de un uso ineficiente de recursos, la desviación de la atención hacia los verdaderos problemas que se han de afrontar. Y en segundo lugar que la tarea del Ingeniero no se limita únicamente a la elaboración de aforos o encuestas sino a su posterior ponderación y análisis, lo que llevará finalmente a la toma de decisiones.

Algunos de los métodos más utilizados a la hora de recoger datos relativos a la demanda son:

- Encuestas en vía pública: Conocer punto de origen y de destino y la causa del desplazamiento
- Encuestas a domicilio: Buscan obtener una información completa. Un encuestador acude a los domicilios y obtiene la información relativa a cualquier tipo de movilidad de las personas (coche privado, peatón, uso de transporte público). Se obtiene mucha información, pero es un procedimiento costoso.

- Encuestas por correspondencia: Se obtiene una información sesgada lo que supone una fuente de información no muy útil.
- Encuestas específicas: Orientadas hacia un determinado aspecto del tráfico como puede ser el estacionamiento.
- Balizas, arcos y peajes: Contaje de vehículos.

Actualmente y en el presente proyecto es muy habitual trabajar con softwares de simulación de tráfico por tanto una tarea importante a realizar es obtener los datos de una manera que posteriormente sean fáciles de introducir en dicho software para que la simulación sea lo más realista posible.

En el caso de Aimsun Next los datos son introducidos a través de los siguientes elementos:

- Red que representa la zona de estudio creada a partir de un mapa de la zona compuesto por eslabones y nodos que representan tanto las calles como los orígenes y destinos.
- Matrices O/D que representan la cantidad de vehículos que van a circular entre nodos, es decir, la demanda.
- Vectores de información para cada eslabón o sección donde se introducen las características relativas a las vías.

El resto de elementos utilizados con el programa Aimsun Next se explican y desarrollan en el anexo 1.

2.1.2.2 Planificación de las vías y el transporte

Probablemente una de las tareas más importantes dentro de la Ingeniería de Tráfico la constituye la Planificación vial y de transporte y el estudio y análisis de su comportamiento futuro a través de la creación de redes simuladas.

En esta tarea es esencial el trabajo conjunto con otros campos como puede ser el Urbanismo o la Economía y puesto que el transporte supone un factor especialmente influyente puede condicionar la solución final que, aunque desde el punto de vista de la Ingeniería sea la más idónea, no lo sea en estos otros campos.

Es por tanto que, a la hora de llevar a cabo la planificación vial, la creación de equipos multidisciplinarios con expertos en varios campos es esencial para que aquellas decisiones finales que se tomen supongan el mayor beneficio posible en todos los ámbitos que puedan afectar a las personas.

Un reto verdaderamente importante a lo largo de los años ha sido el adaptar los núcleos de las ciudades antiguas, construidas sin tener en cuenta el crecimiento exponencial de los vehículos privados, a las necesidades de movilidad que dichos vehículos imponen en las ciudades actualmente.

2.1.2.3 Trazado vial

Aunque la tarea final del diseño del trazado de las vías e intersecciones no sea específicamente propia de un Ingeniero de tráfico sí que es esencial que o la persona encargada de su diseño tenga conocimientos específicos de tráfico, o que un Ingeniero especializado en este campo este presente durante el diseño de dicho trazado o por lo menos revise los planos finales.

Es por tanto que, aunque el ingeniero de tráfico no cuente con los conocimientos técnicos en cuanto a trazado de vías, pertenezca al equipo encargado de esta labor puesto que su conocimiento del comportamiento del tráfico podrá determinar y condicionar la forma en que dicho trazado sea diseñado con el fin de garantizar el mayor nivel de servicio de las vías.

2.1.3 Organización de la Ingeniería de Tráfico

La Ingeniería de tráfico puede prestar sus servicios a organismos de diferentes tipos como los que se especifican a continuación:

- Administración de carreteras, a escala nacional o regional, en las que su campo de actuación se encuentre fuera de las zonas urbanas
- Municipios que tengan problemas de ordenación del tráfico y de planificación urbana
- Administraciones que controlen el urbanismo a escala nacional, regional, provincial y local que precisen de especialistas de tráfico para completar los equipos multidisciplinares que se encargan de elaborar los planes urbanísticos.
- Centros de investigación que de manera autónoma realizan proyectos y análisis referidos al tráfico.
- Empresas privadas altamente ligadas con el tráfico como pueden ser empresas de transporte de mercancías o de pasajeros y consultorías que precisen de ingenieros expertos en la materia o que ofrezcan servicios a las administraciones públicas anteriormente citadas.

Es preciso mencionar que la Organización del tráfico se ha convertido en los últimos años en un serio problema que las localidades con gran cantidad de población están teniendo serias dificultades en afrontar. A los problemas de circulación debidos al constante crecimiento del número de coches en las ciudades hay que sumarle los problemas actuales que existen en cuanto al estacionamiento de dichos vehículos. Poco a poco las ciudades han podido adaptarse para permitir una circulación más o menos fluida de su parque de vehículos, pero en cuanto al estacionamiento las infraestructuras que las ciudades ofrecen crecen a un nivel mucho menor debido a que en este caso el problema es el espacio que se necesita para que todo el parque de vehículos estacionen.

En numerosas ocasiones las ciudades tratan de resolver sus problemas de circulación recurriendo a la Policía municipal de cada ciudad, pero ante la imposibilidad que estas autoridades tienen de dar solución a problemas organizativos se está percibiendo como cada vez más los Ayuntamientos de dichas ciudades recurren a Ingenieros de tráfico

para tratar de solventar los problemas de circulación y estacionamiento que se les proponen. Sin embargo, a pesar del conocimiento que ellos tienen del funcionamiento y comportamiento del tráfico en las ciudades, muchas veces no pueden hacer frente a ciertos problemas puesto que estos derivan de una mala planificación de la ciudad, aspecto que corresponde solventar a otros profesionales.

Si es cierto que, debido a los problemas de planificación que se han ido viendo en los centros de las ciudades, actualmente las nuevas zonas urbanas que se desarrollan sí que están siendo pensadas con el objetivo de garantizar una circulación eficiente y espacios considerables para estacionar vehículos. Además, las nuevas viviendas que se construyen suelen hacerse con plazas de garaje, si bien es cierto que en el caso de Valladolid la Concejalía de Urbanismo a través de los artículos 299 y 423 del PGOU no obliga a que esto se haga siempre que se construye una nueva vivienda.

Si se continua con esta tendencia de desarrollar la planificación urbana teniendo en cuenta el tráfico, es posible que en el futuro se pueda llevar a cabo una ordenación del tráfico más eficaz y que garantice cierta fluidez. Además, como se tratará en el siguiente capítulo, las ciudades están llevando a cabo restricciones de circulación en sus centros para minimizar las emisiones contaminantes y para evitar aglomeraciones y problemas de espacio.

Debido a que la principal actividad de los Ingenieros de tráfico sigue siendo actualmente la resolución de problemas de planeamiento y ordenación del tráfico, ellos cuentan con herramientas que les facilitan dicha actividad como el estudio de medidas tales como la señalización de las calles, el establecimiento de los sentidos de las mismas, el control del estacionamiento o la determinación de qué giros están permitidos o no.

De hecho, la herramienta fundamental con la que cuenta la Ingeniería de Tráfico para llevar a cabo una ordenación del tráfico eficiente y segura es la posibilidad de controlar la señalización (semáforos, señales verticales y marcas viales) que obligará a los usuarios de las vías a seguir ciertas normas que se entiende han sido previamente consideradas por los especialistas correspondientes.

Una vez analizado todo lo anterior se podría decir que dos son las principales razones que llevan a los Ingenieros de tráfico a buscar una correcta ordenación y planeamiento del tráfico: la fluidez y la seguridad.

Hacer posible una circulación fluida se ha convertido en el principal objetivo de los Ayuntamientos de todo el mundo lo que ha llevado a la Ingeniería de Tráfico a tener que desarrollar medidas más cuidadas y afinadas que se apliquen directamente en la ordenación de las zonas urbanas.

La seguridad por otro lado es también un aspecto que sin duda los ingenieros de tráfico se marcan como objetivo. Y no únicamente la seguridad de los usuarios directos de las personas que utilicen las vías sino la de aquellos que se vean afectados por su implantación y que tengan que interactuar con ellas por su cercanía a las mismas o por cualquier otro aspecto. Tratar de minimizar el impacto que las redes viales causen a

aquellas personas que no sean usuarios directos de las mismas es el camino a seguir para garantizar su seguridad.

Con el objetivo de reducir dicho impacto negativo y puesto que es el principal aspecto que motiva la realización de este proyecto no cabe duda que la Ingeniería de Tráfico busca, a través del correcto planeamiento y ordenación del tráfico, la reducción de las emisiones contaminantes producidas por dicho tráfico.

La fluidez del tráfico y evitar aglomeraciones de vehículos en los cascos urbanos con el objetivo de reducir la emisión de gases contaminantes por parte de los vehículos es actualmente uno de los principales objetivos que hacen que ahora más que nunca la Ingeniería de Tráfico sea una de las ramas dentro de la Ingeniería Civil más requeridas.

Sin embargo, todo lo anteriormente descrito será imposible de llevar a cabo sin la revisión y actualización de las normas generales que regulan la circulación. Dichas normas han de ser actualizadas conforme evolucionen las condiciones de tráfico y conforme surjan nuevos problemas con el objetivo de que afrontarlos sea lo más eficiente posible.

2.1.4 Conclusiones sobre la Ingeniería de Tráfico

Como se ha visto la Ingeniería de Tráfico surge en Estados Unidos en los años en que en dicho país se empezaron a fabricar masivamente vehículos privados que se convertirían en el principal medio de transporte para todas las personas. Este rápido crecimiento del parque de vehículos en Estados Unidos generó la necesidad de crear una rama de la ingeniería que se especializase en la gestión de este tráfico que se comenzaba a generar.

Cuando la Ingeniería de Tráfico llegó a Europa, lo hizo de una manera puramente empírica, basada únicamente en la acumulación y análisis de datos centrada en la demostración de ciertas leyes empíricas. Lo que ha llevado a los ingenieros europeos a tener una mayor formación teórica y matemática, aunque con menos capacidad para analizar datos. Sin embargo, los ingenieros europeos a través de ese estudio empírico han contribuido al enriquecimiento de la Ingeniería de Tráfico con teorías más razonadas.

Sin embargo, muchos de los problemas a los que se tuvieron que enfrentar los ingenieros europeos tuvieron que ver con ciudades escasamente preparadas para el tráfico rodado en sus núcleos. Esto sumado a que cada vez más personas pudieron acceder a la compra de vehículos propios generó ciudades en las que sus habitantes tenían vehículos, pero no podían circular eficazmente con ellos. Por tanto, los ingenieros de este campo tuvieron que trabajar conjuntamente con especialistas en urbanismo y poco a poco ir adaptando las ciudades para responder ante la demanda de tráfico.

A partir del momento en el que se tuvo en cuenta el tráfico a la hora de llevar a cabo los planes de desarrollo de las ciudades las nuevas zonas urbanas que se crearon se hicieron pensando en el tráfico rodado. Lo que ha favorecido a lo largo de los años que la circulación por las expansiones de las ciudades sea más fluida.

El tráfico no actúa como un ente estático, sino que evoluciona, y la Ingeniería de Tráfico tiene que adaptarse a dicha evolución. Solo mediante la constante evolución de los métodos y herramientas que la Ingeniería de Tráfico utiliza se podrá hacer frente a los continuos retos y cambios que el tráfico propone.

Una mención especial merece el tema de la contaminación. Actualmente el mayor reto al que se enfrentan los ingenieros de tráfico es la gran cantidad de emisiones contaminantes que generan los vehículos en las ciudades y cuyas consecuencias afectan directamente a la salud de las personas. Todos los ayuntamientos del mundo se plantean diferentes medidas de restricción de tráfico en las ciudades que buscan la reducción de dichas emisiones, sin conocerse aún cuales son verdaderamente eficaces y cuales no lo son. Dichas medidas (algunas serán analizadas en el presente proyecto) generan anomalías en el funcionamiento normal del tráfico y la labor de los ingenieros es estudiar qué aspectos se ven perjudicados y que medidas se pueden llevar a cabo para minimizar dicho impacto negativo.

2.2 Características técnicas del tráfico

El estudio del tráfico no es una tarea sencilla puesto que numerosos factores intervienen en su estudio, sin embargo, tres son las características que permiten definirlo técnicamente. Dichas características no son independientes, sino que existen relaciones entre ellas que posteriormente se analizarán.

Las tres características que definen técnicamente el tráfico son:

- Intensidad de tráfico: Medida de la cantidad de vehículos que pasan por un punto en un determinado espacio de tiempo.
- Composición: Clase de vehículos que constituyen la flota de tráfico
- Velocidad: Tanto la velocidad media de la flota de vehículos que se desplacen por la red de estudio durante el tiempo de estudio, como la velocidad aislada de cada vehículo

Otra característica muy interesante para el estudio de tráfico y que de hecho se estudiará más adelante es la densidad, medida en número de vehículos por unidad de longitud.

2.2.1 Intensidad del tráfico

Se conoce como Intensidad de tráfico al número de vehículos que pasan a través de una sección transversal fija de una carretera por unidad de tiempo.

Existen dos formas de medir la intensidad de tráfico que desde el punto de vista de la Ingeniería de Tráfico resultan interesantes:

- Intensidad media diaria anual (IMD): Número total de vehículos que pasan por un punto o sección transversal determinada de la vía durante todo un año dividido entre los días totales de ese año (365 ó 366)
- Intensidad máxima horaria (IMH): Hace referencia al número de vehículos que pasan por un punto o sección transversal de la vía durante la hora que se considera representativa de las condiciones de mayor circulación.

Cada uno de estos factores de la intensidad interesan desde una tarea diferente dentro de la Ingeniería de Tráfico.

La IMD es interesante desde el punto de vista del Planeamiento, puesto que gracias a ella se pueden llevar a cabo tareas como: Clasificación de las vías, cálculo de índices de accidentes, determinación de uso de las vías, estudios de mejora y económicos, proyectos de señalización y determinación de características geométricas de carácter general.

La IMH se utiliza principalmente desde el punto de vista de la ordenación urbana y de la elaboración de proyectos para tareas como: Capacidad de la vía, características de la vía y de sus intersecciones y enlaces, coordinación de señalización semafórica en intersecciones y ordenación del tráfico.

Cuando un Ingeniero tiene que realizar un estudio acerca de el correcto funcionamiento de una determinada vía, lo determinará valiéndose de la capacidad que dicha vía ofrece para intensidades en hora punta.

Cuando se realiza un estudio de la capacidad de una vía es imprescindible tener en cuenta el factor de las intensidades en hora punta, puesto que, si una vía ofrece una gran capacidad para una intensidad media, pero se colapsa cuando la intensidad es de hora punta, dicha vía no ofrece un buen servicio a sus usuarios.

Muy ligada a la definición de Intensidad va asociado el de Volumen. Por Volumen de tráfico se entiende el número total real de vehículos que pasan por una sección fija de carretera durante un intervalo de tiempo conocido.

Es cierto que ambas definiciones (Intensidad y Volumen) pueden parecer similares pero su diferencia puede entenderse fácilmente con un ejemplo:

Si se considera un intervalo de tiempo de 15 minutos y se lleva a cabo un conteo del número de vehículos que atraviesan la sección transversal de la vía seleccionada se obtiene un resultado total de 250 vehículos, por lo tanto, se dirá que el volumen total de vehículos medido es de 250, mientras que la IMH sería:

$$IMH = \frac{\text{Vehículos}}{\frac{15 \text{ min}}{60 \text{ min}}} = \frac{250}{\frac{15}{60}} = 1000 \frac{\text{veh}}{\text{hora}}$$

Ecuación 2.2-1 Intensidad máxima horaria

Existe un factor que relaciona los volúmenes horarios con la intensidad en hora punta: El Factor de Hora Punta (FPH) que se define como la relación entre el volumen medio de un periodo y la intensidad máxima producida en uno de los intervalos en los que hemos dividido dicho periodo:

$$FPH = \frac{\text{Volumen horario}}{\text{Intensidad de circulación punta}} \\ \text{(dentro de la hora)}$$

Ecuación 2.2-2 Factor de hora punta

Por lo tanto, si se utilizan intervalos de 15 minutos como en el ejemplo el FPH se calculará de la siguiente forma:

$$FHP = \frac{Q}{(4 \times Q_{15})}$$

Ecuación 2.2-3 Factor de hora punta con intervalos de 15 minutos

Siendo:

FPH: Factor de hora punta

Q: El volumen horario en (v/h)

Q₁₅: El volumen durante los 15 minutos punta de la hora en v/15 min

2.2.2 Composición del tráfico

Esta característica del tráfico hace referencia a que los vehículos que circulan por las vías son muy diferentes unos de otros y tiene diferentes características entre sí como pueden ser el peso, las dimensiones o las velocidades a las que circulan.

Por norma general, la composición del tráfico se clasifica en base a umbrales de longitud, considerando vehículos pesados a aquellos que superan el umbral y ligeros al resto.

La composición del tráfico variará de unas vías a otras. Por lo tanto, como es de suponer el porcentaje de vehículos pesados será muy pequeño en los núcleos urbanos llegando a ser menor del 10% en los centros de las ciudades. En las proximidades de las ciudades el porcentaje ascenderá a un 15-20%, mientras que en vías interurbanas los porcentajes pueden encontrarse entre el 20 y el 30% (Datos de la DGT)

A parte de la distinción entre vehículos pesados y ligeros también se puede hacer una clasificación por tipos de vehículos, siendo la más común para estudios sobre el tráfico la que contempla 8 tipos diferentes de vehículos: Bicicletas, motos, coches, camionetas, tractores agrícolas, camiones sin remolque, camiones con remolque y autocares)

Como se comentaba anteriormente la composición del tráfico es muy cambiante en función del tipo de vía y de la época del año en la que se realice el estudio, por lo tanto, a la hora de llevar a cabo un estudio del tráfico es importante considerar que vías van a

ser estudiadas y en función de eso determinar cuál será la composición del tráfico más probable que circulará por dichas vías.

2.2.3 Velocidad

Con carácter general la velocidad se puede definir como la relación que existe entre el espacio recorrido y el tiempo empleado para recorrer dicho espacio, por lo tanto, se medirá en unidades de longitud entre unidades de tiempo, siendo la más utilizada en el estudio del tráfico los km/h.

La velocidad es una de las características más complejas en el estudio del tráfico y existen varios conceptos relativos a la velocidad que sin embargo expresan valores diferentes:

- Velocidad puntual: Velocidad de un determinado vehículo al pasar por un punto.
- Velocidad de circulación: Velocidad media de un vehículo que se encuentra circulando, pero sin tener en cuenta las paradas.
- Velocidad instantánea: Velocidad de un vehículo en un momento determinado.
- Velocidad de recorrido: Velocidad media que alcanza un vehículo al recorrer un tramo de vía determinado.
- Velocidad media espacial: Velocidad media del conjunto de vehículos que en un momento determinado se encuentran en un tramo de carretera dado.
- Velocidad media temporal: Velocidad media del conjunto de vehículos que pasan por una sección transversal fija de la vía durante un periodo determinado de tiempo.

Las dos últimas son velocidades para grupos de vehículos y no para vehículos aislados, por lo que son mucho más interesantes desde el punto de vista de la Ingeniería de tráfico.

$$V_r = \frac{n \times L}{\sum_{j=1}^n t_j}$$

Ecuación 2.2-4 Velocidad media espacial

$$V_l = \frac{\sum_{j=1}^n V_j}{n}$$

Ecuación 2.2-5 Velocidad media temporal

Siendo: n el número total de vehículos, V_j la velocidad del vehículo j, L la longitud del tramo de estudio y t_j el tiempo que el vehículo j se encuentra dentro del tramo L.

La velocidad media espacial también es conocida como velocidad media en un tramo y la velocidad media temporal como velocidad media local.

En una red por la que circulan numerosos vehículos es imposible que todos lo hagan con velocidades uniformes por lo tanto ante tal variación de velocidad de cada vehículo la velocidad media espacial siempre será menor que la temporal puesto que en la primera los vehículos que circulen a velocidades bajas tendrán mucho peso puesto que permanecerán más tiempo en el tramo de estudio.

Otras velocidades que se pueden estudiar y que son interesantes desde el punto de vista del trazado de la vía son:

- Velocidad específica de un elemento de trazado: Se utiliza principalmente para el cálculo de trazado de curvas y mide la velocidad máxima que puede mantenerse a lo largo de un elemento de trazado aislado de manera cómoda y segura.
- Velocidad de proyecto de un tramo: Velocidad utilizada para definir las características geométricas mínimas necesarias para garantizar seguridad y comodidad de los elementos de trazado.
- Velocidad de planeamiento de un tramo: Media armónica de las velocidades específicas de los elementos de trazado de tramos homogéneos en longitudes superiores a 2 Km.

Cabe destacar también que la velocidad es una característica que influye enormemente en otros aspectos de la conducción como pueden ser: La visibilidad mínima, la distancia de parada, la distancia de adelantamiento o la distancia de cruce.

2.2.4 Densidad de tráfico

Se entiende por densidad de tráfico al número de vehículos que hay en un tramo de vía por unidad de longitud en un instante dado.

$$d = \frac{n}{L}$$

Ecuación 2.2-6 Densidad de tráfico

Siendo:

d= Densidad de vehículos en la vía de longitud L en un determinado momento.

n= Número de vehículos en la vía.

L= Longitud de la vía.

La densidad es un factor que influye enormemente en la calidad de la circulación ya que con densidades altas de tráfico se hace más complicado mantener velocidades constantes por lo tanto los conductores se ven obligados a realizar un mayor número de maniobras por lo que se pierde confort en la conducción.

Es probable que la densidad de tráfico sea la característica más detectada por los usuarios de la vía, por lo tanto, muchas veces los conductores relacionan esta variable

con la calidad de circulación lo que la convierte en una característica de gran interés para el estudio.

Existe un valor máximo de la densidad de tráfico que se corresponde cuando todos los vehículos se encuentran en fila sin distancia entre ellos y parados. A medida que el valor de la densidad de una determinada vía se acerca a su valor máximo la circulación se va haciendo cada vez más lenta y la frecuencia de paradas y arranques también aumenta.

2.3 Relación entre las características técnicas del tráfico

Entre las características técnicas del tráfico que han sido descritas anteriormente (Intensidad, Velocidad y Densidad) existen relaciones que permiten el cálculo de cada una de ellas a partir de los valores de las otras

Existe una relación fundamental de las tres variables a partir de la cual se deducen el resto de relaciones dos a dos:

$$I = D \times V$$

Ecuación 2.3-1 Relación de las variables fundamentales del tráfico

2.3.1 Intensidad y velocidad

La relación que existe entre la Intensidad y la Velocidad es inversamente proporcional puesto que para intensidades de tráfico bajas los conductores que están circulando podrán determinar libremente a que velocidad desean circular, sin embargo, para intensidades de tráfico elevadas la velocidad de cada vehículo se verá fuertemente condicionada por la del resto de vehículos que circulan con él. La velocidad puede estar influenciada también por otros factores como las condiciones de la calzada o las características del propio vehículo, pero para intensidades de tráfico muy elevadas la velocidad se verá muy poco influenciada por estos otros factores.

El comportamiento anteriormente citado se observa mejor en tramos completos y no en secciones de vía aislados, siendo los tramos de la mayor longitud posible para la obtención de resultados de mayor calidad y consistencia.

La relación entre Intensidad y Velocidad como la que representa la figura siguiente no se cumple para condiciones de circulación interrumpida con un gran número de paradas y arranques como las que se pueden dar en los cascos urbanos.

Por lo tanto, la relación Intensidad-Velocidad en condiciones de circulación continua se puede representar mediante curvas similares a la que aparece representada en la siguiente imagen:

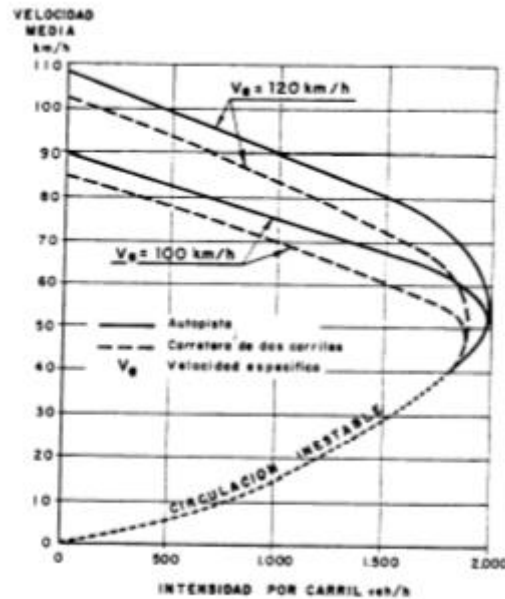


FIG. 10 RELACION VELOCIDAD-INTENSIDAD

Ilustración 2.3-1 Relación Intensidad-Velocidad. Fuente: Manual de Carreteras, E., 2000, p.164.

Se observa que se representan dos tipos de velocidades para cada valor de la intensidad. La parte superior de la curva se correspondería con una circulación libre y continua mientras que la parte inferior representa una circulación discontinua y congestionada.

Si se analizasen dichas curvas para diferentes carreteras se vería que estas serían diferentes en su parte superior (velocidades elevadas) y similares en su parte inferior (velocidades bajas).

La parte superior de la curva es la que más interés tiene desde el punto de vista del análisis ya que se corresponde con condiciones de circulación más estables por lo tanto se podría considerar más o menos lineal y la variación que experimentaría entre unas carreteras y otras sería su inclinación y ordenada en el origen.

2.3.2 Velocidad y densidad

La relación entre Velocidad y Densidad es similar a la de Velocidad e Intensidad analizada anteriormente. Su relación también es inversamente proporcional puesto que para mayores densidades la velocidad de circulación se verá disminuida.

Si la densidad es muy baja los conductores no se cruzarían con muchos vehículos durante su circulación y por lo tanto podrían elevar su velocidad o al menos adaptarla a sus necesidades, mientras que, si la densidad es muy alta la velocidad de los vehículos se verá influenciada por la del resto de vehículos con los que circula y con los cuales se cruzará más frecuentemente.

Siempre que se habla de velocidad de los vehículos se hace referencia a su velocidad media que se obtiene de las velocidades de cada vehículo que son menos dispersas a medida que la densidad aumenta.

Por lo tanto, la velocidad media resulta ser una función de la densidad que alcanza su valor máximo cuando la densidad tiende a cero y que disminuye constantemente a medida que la densidad aumenta hasta conseguir su valor máximo que, como se describe anteriormente, se corresponde con una cola de vehículos sin distancia entre ellos y parados.

En cuanto a la influencia que las características de la calzada puedan ejercer sobre ambas variables aumentará cuando la densidad sea baja y será prácticamente inexistente para densidades altas.

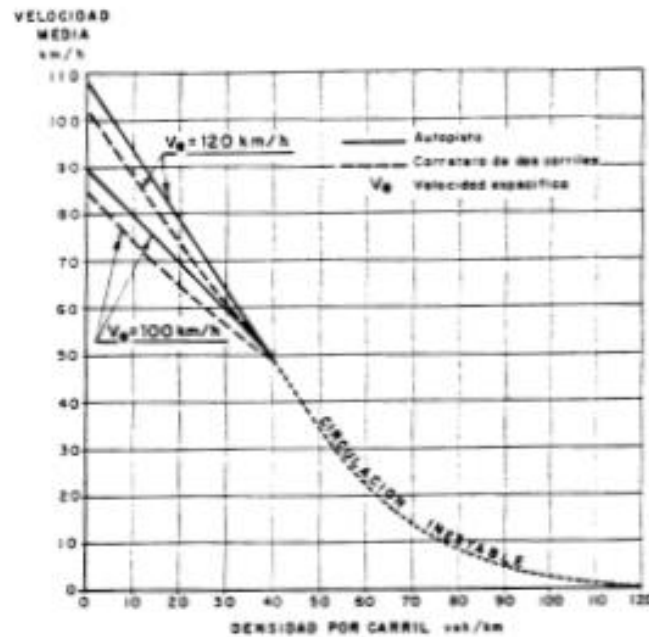


Ilustración 2.3-2 Relación Velocidad-Densidad. Fuente: Manual de Carreteras, E., 2000, p. 163

2.3.3 Intensidad y densidad

La relación entre Intensidad y Densidad a diferencia de las anteriores es proporcional es decir que cuando la densidad sea nula, la intensidad también lo será.

Cuando se representa la intensidad en función de la densidad la función que se obtiene es convexa alcanzando un máximo para un determinado valor de la densidad. Las curvas que se obtengan cuando se lleve a cabo esta relación serán diferentes en función de las carreteras donde se aplique dicha relación, observándose mayores diferencias en la zona de densidades bajas.

Un elemento muy importante de estudio es el de Densidad Crítica, que se corresponde con la densidad necesaria para alcanzar el valor máximo de la intensidad para un tramo de vía (Capacidad de la vía). Para densidades por debajo de la densidad crítica la circulación será fluida y cualquier perturbación que pueda suponer un ligero aumento de la densidad esta se disipará rápidamente y se volverá a la situación de estabilidad anterior. Por el contrario, para densidades de tráfico por encima de la crítica cualquier perturbación podría hacer que la circulación se viese altamente perjudicada incluso llegando a detenerse.

A continuación, se muestra la curva que relaciona Intensidad y Densidad:

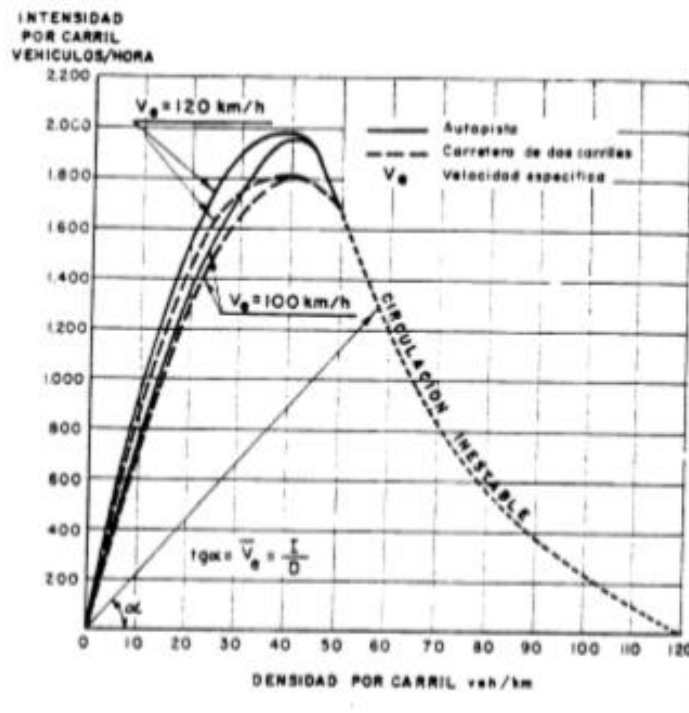


Ilustración 2.3-3 Relación Intensidad-Densidad. Fuente: Manual de Carreteras, E., 2000, p.162

Observamos que como se comentaba anteriormente la curva es convexa siendo la capacidad de la vía para autopistas de 2000 vehículos/hora y la densidad crítica de 40 vehículos/Km.

Se puede observar también que la rama ascendente de la curva se corresponde con una circulación fluida y condiciones de tráfico aceptable y por el contrario la rama descendente representaría condiciones de circulación inestables con numerosas paradas y arranques.

A través de esta curva, que también recibe el nombre de “Curva Fundamental del Tráfico”, se puede calcular también la velocidad media como la pendiente de la recta que une el origen con el punto de la curva que se desee estudiar.

2.4 Capacidad y nivel de servicio

Dos aspectos muy relevantes que definen la calidad de las carreteras y que están estrechamente relacionados son la Capacidad y el Nivel de servicio que se van a describir a continuación.

2.4.1 Capacidad

La capacidad de un tramo de vía haría referencia a la máxima intensidad que una vía puede soportar sin llegar a colapsarse. Su definición técnica haría referencia al número de vehículos que pueden estar o atravesar una determinada vía en un periodo determinado de tiempo para unas condiciones determinadas de tráfico y vía.

Se podría hacer una diferenciación en cuanto a capacidad se refiere: Capacidad de la red y capacidad del vehículo:

- Capacidad de la Red: La medida en tanto que la red proporcione las condiciones necesarias para satisfacer la demanda y que la circulación sea posible
- Capacidad del vehículo: La medida en tanto que el vehículo tenga las prestaciones necesarias para responder ante cualquier solicitud del conductor.

A través de la utilización de curvas de distribución de la probabilidad se han conseguido crear mecanismos que permiten determinar cuál es la capacidad real de una vía partiendo del valor de su capacidad teórica.

Conocida la capacidad teórica de una vía existen una serie de características de la misma que influyen en el tiempo que los vehículos que circulan por la vía emplean en recorrer un determinado trayecto, como pueden ser: Condiciones meteorológicas, la carga, paradas y arranques, habilidad del conductor, etc. Todas estas características suponen limitaciones que determinarán un tiempo mínimo necesario para completar el trayecto.

Una vez determinada la capacidad teórica de la vía en vehículos/hora se puede calcular el número teórico máximo de vehículos que pueden circular por ella sin que se colapse. Sin embargo, este valor teórico no es aplicable en la práctica puesto que el tiempo de interferencia promedio para un conjunto de condiciones es proporcional al número de vehículos que operan en un tiempo dado.

La General Electric Company desarrolló unos diagramas de avance horario que permiten conocer el número máximo de vehículos que pueden circular una vía sin que se supere su capacidad teórica. Es decir, que la capacidad real de la vía que será la que se utilice en la práctica siempre será menor que su capacidad teórica. La capacidad teórica de la vía se obtendrá integrando la función de probabilidad de los diagramas de avance horario.

La capacidad de las vías se puede expresar mediante diferentes fórmulas matemáticas, estas fórmulas se encuentran restringidas por la “distancia de seguridad” que el conductor emplee en su conducción. Dicha distancia de seguridad aumenta normalmente a medida que también lo hace la velocidad por lo tanto de esto se puede deducir la existencia de unos valores de distancia y velocidad óptimos que permiten que un número máximo de vehículos pasen por un punto en una hora.

Por lo tanto, se podría decir que la capacidad de una vía equivale a la proporcionalidad entre distancia de seguridad y velocidad. Estudios realizados han establecido que por cada aumento de 10 Km/h, la distancia de seguridad entre vehículos aumenta 6 metros

A través de estudios realizados se ha estipulado que la capacidad teórica máxima se obtiene para un flujo de 2000 vehículos/hora a 50 km/hora, por lo tanto, la máxima densidad se produce cuando hay tantos vehículos que se encuentran todos parados y sin movimiento.

Cuando la densidad aumenta tanto que se hace imposible rebasar al resto de vehículos que están circulando, todos los vehículos se mueven como una “masa” aproximadamente a la misma velocidad por lo tanto la velocidad relativa entre los vehículos de esa “masa” es nula, momento en el cual se alcanza la densidad crítica por lo que cualquier aumento de la misma supondrá una reducción de la velocidad y volumen de dicha “masa”.

Se ha determinado que las condiciones ideales para conseguir el flujo máximo no interrumpido son carriles de 3,66 metros y 1,83 metros de ancho libre entre acotaciones laterales, sin vehículos comerciales y con condiciones de visibilidad óptimas.

La fórmula que determina la capacidad sería la siguiente:

$$C = 2000 \times M \times w \times T_C \times B_C$$

Ecuación 2.4-1 Capacidad de la vía

Siendo:

M = Número de carriles

w = [0,1] En función del estado y características de la vía

T_C = Camiones circulando

B_C = Autobuses circulando

Tanto el número de camiones como de autobuses (T_C y B_C) que se encuentran circulando vienen dado por dos expresiones matemáticas:

$$T_C = \frac{100}{100 - \%T + E_T \times \%T}$$

Ecuación 2.4-2 Factor de camiones en circulación

$$B_C = \frac{100}{100 - \%B + E_B \times \%B}$$

Ecuación 2.4-3 Factor de autobuses en circulación

Siendo:

E_T = Factor de influencia de la presencia de camiones en el tráfico

E_B = Factor de influencia de la presencia de autobuses en el tráfico

Los valores que adquieren tanto E_T como E_B para las diferentes características de la vía son los que se muestran en la siguiente tabla:

	LISO LLANO	CURVO LLANO	CURVO ONDULADO	MONTAÑA
E_T	2	4	8	12
E_B	1,6	3	5	8

Tabla 2.4-1 Valores de los factores E_T y E_B . Fuente: Ingeniería del transporte E.P.B.

A continuación, observamos una curva que muestra la capacidad máxima de un carril en diferentes situaciones:

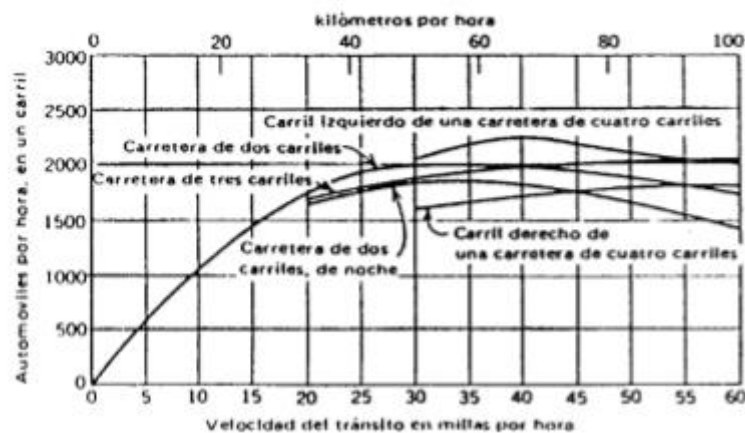


Ilustración 2.4-1 Capacidad máxima de un carril. Fuente: Ingeniería del transporte E.P.B.

Se observa como a medida que nos aproximamos a la capacidad máxima de la vía existe mayor interferencia entre los vehículos que circulan por ella y que por lo tanto se crean mayores demoras, lo que contribuye al aumento de tiempos promedio de viaje.

2.4.2 Niveles de servicio

El nivel de servicio en Ingeniería de Tráfico es una medida cualitativa de la calidad del flujo de una vía. Como se veía anteriormente, cuando la intensidad de tráfico y la capacidad de una vía se igualan, las condiciones de circulación empeoran notablemente y las condiciones de trazado pierden su influencia.

Para un nivel de servicio seleccionado, la intensidad máxima de tráfico que la vía puede soportar recibirá el nombre de "Intensidad de servicio".

Para cualquier usuario de una vía el nivel de servicio de la misma debería depender de varios factores como pueden ser los siguientes:

- Velocidad y tiempo de recorrido
- Interrupciones: Número de paradas y arranques que es necesario realizar
- Posibilidad de mantenimiento de la velocidad deseada
- Confort en la conducción

- Coste económico del trayecto
- Conectividad: Facilidad de acceso a diferentes puntos o rutas del trayecto
- Servicios: Frecuencia de estaciones de servicio, áreas de descanso, etc.

Sin embargo, resulta muy complicado tener en cuenta todos estos factores que, además, pueden ser puramente subjetivos.

Es por ello, que el Manual de Capacidad de Carreteras (1995) insta a identificar el Nivel de Servicio en función de la velocidad o el tiempo que se emplea para recorrer un determinado tramo de vía. También propone la utilización de un segundo índice que relaciona la anteriormente descrita Intensidad de Servicio y la capacidad, llamado “Índice de Servicio”.

Para la obtención de dichos índices es recomendable seguir los siguientes pasos y criterios:

- Dividir el tramo en cuestión en diferentes subtramos.
- Por cada uno de los subtramos medir su capacidad e intensidad en vehículos/hora.
- Los niveles de servicio se establecerán para tramos de vía largos y se deberá tener en cuenta las características de los diferentes subtramos que lo integren.
- La longitud de los subtramos debe ser similar para que posteriormente se pueda llevar a cabo una ponderación uniforme de los valores de velocidad e intensidad de cada uno de ellos.
- Para la determinación de los Niveles de Servicio se lleva a cabo una diferenciación de los valores de la velocidad y de los índices empleados en función del tipo de vía: Autopistas y Autovías, Carreteras de cuatro o más carriles, Carreteras de dos o tres carriles, Grandes arterias urbanas y Calles céntricas.

Teniendo en cuenta todos los factores anteriores se han establecido 6 niveles de servicio que se han nombrado con letras desde el más favorable (A) al más colapsado (F):

Nivel de Servicio A (Circulación Libre)

Representa unas condiciones de circulación muy favorables: libertad y fluidez. Estas condiciones se consiguen cuando la Intensidad de Servicio es muy pequeña y por tanto se permite una velocidad de circulación elevada. Además, los conductores tienen facilidad de maniobra lo que les permite adaptar la velocidad a sus necesidades. Cualquier tipo de perturbación que se produzca es rápidamente amortiguada sin influir en la circulación general.

Nivel de Servicio B (Circulación Estable)

Representa unas condiciones bastante favorables dentro de la Circulación libre donde los conductores aún conservan bastante libertad de maniobra y de selección de la velocidad. Sin embargo, dicha velocidad comienza a verse levemente influenciada por

condiciones de tráfico. No llegan a formarse colas puesto que aún hay posibilidad de adelantamiento.

Nivel de Servicio C (Circulación estable con mayor demanda)

La circulación es estable pero la libertad del conductor se ve reducida por las condiciones del tráfico. Los conductores ya no pueden seleccionar la velocidad que deseen, sino que esta se verá influenciada por el resto de los usuarios de la vía. Los cambios de carril y adelantamiento también se verán influenciados por dichas condiciones.

Nivel de Servicio D (Circulación ligeramente inestable)

La circulación se aproxima a la inestabilidad. La posibilidad de adelantamientos y cambios de carril se ve significativamente reducida por lo que la velocidad media baja y se iguala entre los vehículos que se encuentran circulando. Pueden llegar a formarse caravanas. Ante cualquier aumento de la intensidad pueden llegar a producirse detenciones.

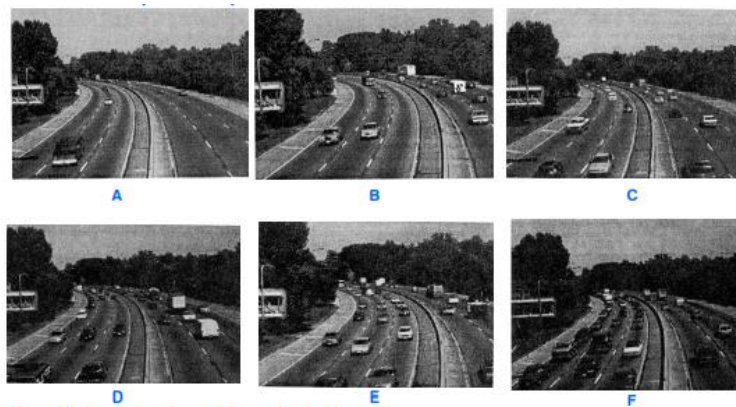
Nivel de Servicio E (Circulación inestable)

La Intensidad de servicio se encuentra muy próxima a la capacidad crítica de la vía. Se forman grandes caravanas en la que la distancia entre vehículos es muy reducida. Dicha velocidad es bastante uniforme y oscila en torno a los 50 Km/h. El número de paradas y arranques aumenta su frecuencia. Es la situación límite antes de grandes colapsos en las vías.

Nivel de Servicio F (Flujo forzado y congestión)

La intensidad de entrada supera a la capacidad de salida por lo tanto el flujo es muy forzado y la velocidad muy baja. El número de detenciones es elevado incluso llegando a producirse detenciones de gran duración. Ante esta situación se concluye que la capacidad de la sección es insuficiente para la demanda.

A continuación, se muestran unas imágenes de la apariencia que tendría una autopista en cada una de las situaciones anteriormente descritas:



*Ilustración 2.4-2 Estado de las vías en los diferentes niveles de servicio.
Fuente: "Ingeniería de tráfico en entornos urbanos" Álvaro Fernández Heredia. UE.*

Existe también un gráfico que muestra los diferentes niveles de servicio en función de la velocidad de servicio y el índice de servicio:

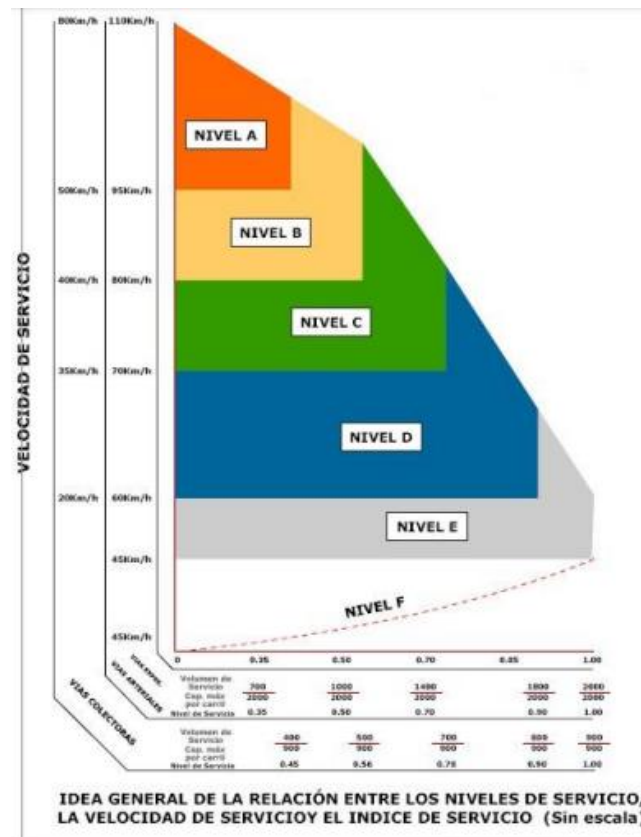


Ilustración 2.4-3 Niveles de servicio de las vías. Fuente: Antonio Valdés -Roldán 1982

2.5 Intersecciones

Consisten en unir, converger y divergir distintos flujos de tráfico que llegan o parten desde un mismo punto. Es preciso que se tenga en cuenta el espacio donde se va a diseñar o analizar la intersección, la forma de la misma y su ordenación. El diseño es un factor importante a tener en cuenta ya que debe aportar un intervalo de tiempo para la realización de las maniobras y garantizar seguridad y visibilidad para las mismas.

Existen muchos tipos diferentes de intersecciones, pero debido a la importancia que adquieren en el presente proyecto, solo se analizarán tres de ellas:

- Intersecciones convencionales a nivel
- Intersecciones semafóricas
- Intersecciones giratorias o glorietas

A continuación, se describirán las características y los tipos más comunes de cada uno de los tipos de intersecciones.

2.5.1 Intersecciones convencionales a nivel

Las intersecciones convencionales son aquellas que canalizan a nivel el encuentro o cruce de vías sin señalización semafórica o circulación circular.

Este tipo de intersecciones pueden ser clasificadas mediante diferentes criterios:

En función de si están reguladas mediante señalización específica o si por el contrario ante la falta de señalización se sigue el criterio de ceder el paso a la derecha:

- Señalizadas
- No señalizadas

En función de si cuentan con isletas centrales que favorezcan la canalización del tráfico:

- Canalizadas
- Sin canalizar

En función de su diseño y número de ramales:

- **Intersecciones en “T” (3 ramales):** A su vez se clasifican en cinco tipos (A,B,C,D,E) y suelen contar con isletas triangulares para reducir el área de conflicto. Su ángulo mínimo entre dos ramales suele ser superior a 60°.
- **Intersecciones en “Y” (3 ramales):** A su vez se clasifican en cuatro tipos (A,B,C,D) y se pueden encontrar ángulos menor a 60°.
- **Intersecciones en “+” (4 ramales):** Se caracterizan por ángulos superiores a 60°.
- **Intersecciones en “X” (4 ramales):** Presentan ángulos menores a 60°.

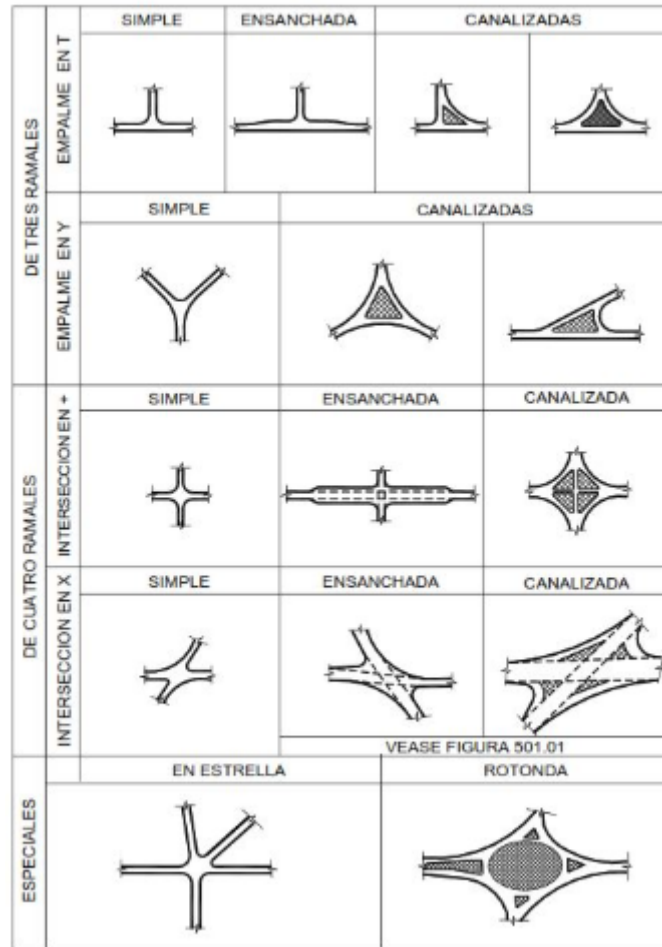


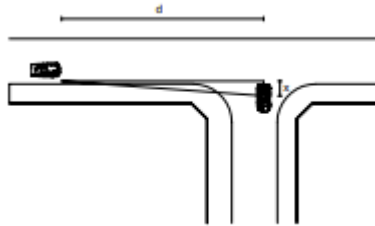
Ilustración 2.5-1 Tipos de intersecciones. Fuente: Exposición Nº 15 U.A.P

Los radios de giro, según el tipo de vías serán los establecidos en la siguiente tabla:

RADIOS MÍNIMOS DE GIRO EN BORDILLO INTERIOR DE INTERSECCIONES A NIVEL PARA LOS MOVIMIENTOS PERMITIDOS			
Tipos de vías			Radio mínimo en bordillo (m)
Vías urbanas sin vía de servicio y vía distrital			10
Vías Locales Colectoras	Áreas residenciales	1 carril por sentido	10
		2 o más carriles por sentido	6
Áreas industriales y comerciales			10
Vías Locales de acceso	Áreas residenciales	Calzada con 1 solo carril	6
		Calzada con dos o más carriles	4
	Áreas industriales y comerciales		

Tabla 2.5-1 Radios mínimos de giro en bordillo interior de intersecciones a nivel para los movimientos permitidos. Fuente: Estudio y accesibilidad urbanística F.R.L.

En cuanto a la visibilidad de parada que se necesita al aproximarse a una intersección cabe destacar que esta se encuentra determinada por la velocidad de referencia o



*Ilustración 2.5-2 Distancia mínima de visibilidad en intersección en T.
 Fuente: Estudio y accesibilidad urbanística.
 F.R.L.*

velocidad de proyecto de la vía. Así pues, dichas distancias vienen determinadas en la siguiente tabla:

DISTANCIAS MÍNIMAS DE VISIBILIDAD DE PARADA EN INTERSECCIONES				
Velocidad (Km/h)	20	30	40	50
Distancia mínima de visibilidad de parada (m)	15	20	32	50

*Tabla 2.5-2 Distancias mínimas de visibilidad de parada en intersecciones. Fuente: Estudio y accesibilidad urbanística
 F.R.L.*

En cuanto al ámbito de aplicación de este tipo de intersecciones en áreas urbanas cabe destacar que no es recomendable utilizar isletas centrales salvo en el caso de garantizar la seguridad de peatones. En este tipo de áreas las intersecciones más recomendables son en “T” o en “+” debido a su mayor adaptabilidad al entramado de la red y facilidad de circulación por ellas. Para intersecciones con ángulos menores a 60° nunca han de utilizarse señales de STOP.

2.5.2 Intersecciones semaforizadas

Se entiende por intersección semaforizada aquella que está regulada mayoritariamente por sistemas de luces (semáforos) que establecen las prioridades de paso. La utilización de semáforos es eficaz para la reducción de la congestión en intersecciones con alta demanda y también aumenta la seguridad de tránsito por la misma.

Dependiendo de la regulación que se utilice existen varios tipos de sistemas de semaforización:

- Sistemas de ciclo y fases de duración prefijada: Dichas duraciones se mantienen constantes sin tener en cuenta variaciones de tráfico.
- Sistemas coordinados en “olas verdes”: Conjunto de intersecciones que se programan conjuntamente para permitir el tránsito de vehículos sin que se detengan. Es necesario cuadrar las velocidades y los offset (tiempo que pasa desde que se pone en verde un semáforo y el siguiente)

$$V = \frac{B}{L}$$

Ecuación 2.5-1 Ola verde

Siendo:

v= La velocidad necesaria para la ola verde

B= Distancia entre semáforos

L= Offset

- Sistemas adaptables automáticamente a la demanda: La duración de las fases del ciclo varían en función de los datos de la longitud de colas que se estén generando.
- Sistemas que conceden prioridad al transporte público: Al aproximarse un vehículo de transporte público un sensor lo capta e induce la fase de verde.
- Semáforos accionables por peatones: Se activa la fase de verde cuando un peatón presiona un pulsador.

La calidad de progresión entre varias intersecciones seguidas viene determinada por un parámetro de medida que en función de su valor establece la calidad de dicha progresión. Este factor se calcula de la siguiente manera:

$$R_c = \%VEH_{g_i} \times \frac{C}{g_i}$$

Ecuación 2.5-2 Factor de calidad de progresión

Siendo:

$\%VEH_{g_i}$ = Porcentaje de vehículos que llegan a la intersección en verde

C= Tiempo del ciclo semafórico

g_i = Tiempo de verde efectivo

La interpretación de los valores de R_c es la que aparecen en la siguiente tabla:

VALOR	CALIDAD DE LA PROGRESIÓN
< 0,5	Muy desfavorable
0,5 - 0,85	Desfavorable
0,85 - 1,15	Aleatoria
1,15 - 1,5	Favorable
1,5 - 2	Muy favorable
> 2	Ideal

Tabla 2.5-3 Tipo de progresión en función del valor del factor de progresión R_c . Fuente: Ingeniería del transporte E.P.B.

Al igual que para las vías, las intersecciones semafóricas también tienen seis niveles de servicio (A,B,C,D,E,F).

-Nivel de Servicio A (Demoras menores de 5 segundos)

El avance de los vehículos es muy favorable y casi no llegan a detenerse puesto que la mayoría llegan a la intersección en su fase de verde.

-Nivel de Servicio B (Demoras entre 5 y 15 segundos)

El avance de vehículos es favorable con detenciones esporádicas. Es característico de intersecciones con ciclos semafóricos cortos.

-Nivel de Servicio C (Demoras entre 15 y 25 segundos)

El ciclo de los semáforos es mayor y por lo tanto las demoras son considerables. El número de vehículos que han de parar en la intersección es mayor.

-Nivel de Servicio D (Demoras entre 25 y 40 segundos)

Los ciclos semafóricos son largos y el número de vehículos que se detienen aumenta considerablemente. Se comienzan a notar indicios de congestión.

-Nivel de Servicio E (Demoras entre 40 y 60 segundos)

La capacidad de los ciclos individuales es insuficiente. La congestión se hace evidente debido al gran número de vehículos que se detienen y forman colas.

-Nivel de Servicio F (Demoras mayores de 60 segundos)

Se produce una sobresaturación puesto que la intensidad de llegada de vehículos supera la capacidad de la intersección. El Nivel de Servicio es inaceptable puesto que cada vehículo emplea más de un minuto en atravesar la intersección.

Estos niveles de Servicio se ven afectados por una serie de factores que influyen en las intersecciones semafóricas:

- Condiciones físicas y de operación: Anchura del acceso (posible formación de cuellos de botella), anchura de los carriles, posibilidad de estacionamiento en la intersección o en las calles que llegan a la misma y sentido de los carriles.
- Condiciones ambientales: **Factor de carga** (grado en el que la fase en verde es utilizada. Relaciona el número de fases verdes utilizadas y el número total de fases en verde. Sus valores son 0 si siempre que el semáforo se pone en verde da tiempo a que crucen todos los vehículos que se encontraban esperando, o 1 si por el contrario el tiempo de verde es insuficiente para que crucen todos los vehículos y alguno de ellos tendrá que esperar más de un ciclo para cruzar) y el **factor de hora de máxima demanda** (se encarga de medir la consistencia de la demanda, se define como la relación entre el número de vehículos que aparecen durante la hora de máxima demanda y cuatro veces los vehículos que aparecen en los 15 minutos consecutivos de máxima intensidad. Para intersecciones con cargas elevadas los valores utilizados son en torno a 0.85 y para intersecciones con flujos elevados los valores oscilan entre 6.6 y 0.7).
- Medidas de control: señales y su visibilidad, número de pasos de cebra, duración de los ciclos semafóricos y su tiempo de verde, las marcas viales, etc.
- Características del tránsito: Porcentaje de vehículos que hacen giros (especial interés en giros a la izquierda), porcentaje de turismos, motos, camiones y autobuses, porcentaje de paradas de transporte público (entorpecen la circulación especialmente en vías de un único carril).

Un factor muy interesante en el Nivel de Servicio no solo de la vía sino del transporte en si es el **Tiempo de viaje puerta a puerta** que hace referencia no solo al tiempo que permanecemos dentro del medio de transporte sino del tiempo total desde que salimos del origen y hasta que llegamos al destino. Algunos medios de transporte como el avión, a pesar de que operan a grandes velocidades no tienen un factor de tiempo de viaje puerta a puerta muy bueno.

Finalmente cabe destacar que el ámbito de aplicación de este tipo de intersecciones semafóricas suele ser en áreas urbanas donde la intensidad de tráfico sea alta ya que este tipo de intersecciones proporcionan unas reglas de paso simples y universales.

La señalización semafórica es especialmente recomendable en intersecciones con mala visibilidad.

2.5.3 Intersecciones giratorias o glorietas

Se entiende por intersección giratoria o glorieta a todas aquellas intersecciones que se basen en la circulación de los vehículos en una calzada anular que discurra en torno a una isleta central y que otorgue la preferencia a aquellos vehículos que circulan por dicha calzada anular.

Las glorietas se clasifican en los siguientes tipos:

- Miniglorietas: Glorietas con un islote central de un diámetro reducido (menor a 4 metros).
- Glorietas dobles: Glorietas consecutivas de dimensiones similares y que se encuentran unidas por un tramo recto de vía.
- Glorietas a distinto nivel: Aquellas que se construyen a distinto nivel de una vía, para solucionar su intersección con una vía principal. Su principal utilización es a la salidas o entradas de autovías y autopistas.
- Intersecciones anulares: Intersección giratoria en la que existe una circulación doble con dos sentidos.
- Glorietas partidas: Aquellas en las que el ramal principal atraviesa el islote central.
- Glorietas semaforizadas: Intersecciones que cuentan con sistema de semaforización que regula la entrada a la propia glorieta.

La capacidad las glorietas depende de dos factores principalmente: de su geometría y del tráfico de entrada y de salida por cada uno de los ramales.

Para el cálculo de la capacidad de entrada por cada ramal a una glorieta con un único carril anular existe una fórmula que aparece en el CETUR, 1989 que es la siguiente:

$$Q_e = 1500 - \frac{5}{6}(Q_c + 0,2Q_s)$$

Ecuación 2.5-3 Capacidad de entrada por cada ramal a una glorieta

Siendo:

Q_e = Capacidad de una entrada en vehículos/hora

Q_c = Tráfico que circula por el interior de la glorieta en vehículos/hora

Q_s = Tráfico que sale por el mismo ramal en vehículos/hora

Esta fórmula es aplicable a glorietas con características diferentes llevando a cabo algunas correcciones:

Para glorietas de más de 30 metros de diámetro y una anchura de la calzada anular superior a 8 metros que permita la doble circulación, Q_c deberá ser multiplicado por 0,7.

Para glorietas de diámetros entre 10 y 30 metros, con calzada anular que no permita la doble circulación, pero si se permita la doble circulación en la entrada, Q_c deberá ser multiplicado por 0,9

Para entradas de doble carril, la capacidad se supone un 40% mayor por lo tanto el resultado de la fórmula ha de multiplicarse por 1,4.

Como se comentaba anteriormente las intersecciones giratorias dotan de preferencia a aquellos vehículos que ya circulan por ellas por lo tanto su utilización es de especial interés cuando se pretende generar un cambio en el régimen de circulación como puede ser la llegada desde una circulación continua a un núcleo urbano o para reducir la velocidad de vías principales.

En cambio, no se recomienda el uso de glorietas en intersecciones con una abundante presencia de peatones, zonas donde el transporte público deba realizar paradas o regímenes de tráfico muy semaforizados por la llegada de "olas de tráfico".

2.6 Control del tráfico rodado

Debido a que el tráfico es un elemento dinámico, cambiante y que forma parte de la vida cotidiana de las personas es necesario establecer sistemas que lo controlen para garantizar su efectividad y seguridad. A continuación, se describen dichos sistemas de control.

2.6.1 Conceptos y objetivos del control

La función de control del tráfico busca cumplir con 3 objetivos principales:

- Conseguir la máxima seguridad.
- Utilización eficiente de la red.
- Facilidad y confiabilidad de maniobra.

La tarea de control no es fácil ya que persigue objetivos que pueden llegar a ser contradictorios. Un uso eficiente de la red implica que la velocidad de circulación no sea muy baja y sea fluida, pero por otro lado esto choca ligeramente con la búsqueda de la seguridad ya que a mayores velocidades la posibilidad de colisión es mayor y por supuesto a mayores velocidades las consecuencias de dicha colisión aumentan en gravedad. Por otro lado, se busca un uso eficiente de la red, lo que implica aprovechar al máximo la capacidad de tránsito y por lo tanto que haya un mayor número de vehículos circulando y eso hará que la velocidad de circulación disminuya.

Por lo tanto, los encargados de controlar el tráfico han de buscar la intensidad de circulación mayor posible garantizando la seguridad y minimizando la probabilidad de colisión. Como se veía anteriormente la intensidad es función de la velocidad, por lo tanto, la búsqueda de la intensidad máxima implicará la búsqueda de la velocidad óptima de circulación.

El control implica llevar registros del movimiento de todos los vehículos que circulan por la red, así como hacerles llegar a los conductores de esos vehículos información necesaria.

Dentro de la tarea de control uno de los primeros pasos que se han de dar es determinar que parte de la tarea de control se deja al operados y que parte ha de ser automática. En algunos sistemas el operador puede desempeñar únicamente tareas de vigilancia, combinándolo en ocasiones con la posibilidad de anular los controles automáticos en caso de emergencia o cambio de planes.

La complejidad de la tarea de control reside actualmente en varios factores como pueden ser la creciente complejidad de los aparatos de control y el aumento de las densidades de tránsito en las vías que tienen una capacidad limitada, lo que disminuye el tiempo de reacción de los operadores ante cualquier circunstancia que se pueda dar. Por lo tanto, la capacidad que deben tener los operadores mental y física para tomar decisiones en instantes muy cortos de tiempo ha de ser muy grande.

Durante la conducción hay innumerables circunstancias que pueden implicar un cambio de movimiento del vehículo. Algunas no han de ser especialmente peligrosas como la llegada a una curva, cuya gestión para el operador será sencilla y únicamente implicará una reducción de la velocidad.

Este tipo de situaciones son fácilmente solventadas por el operador ya que la peligrosidad es de antemano conocida y además el servicio de gestión de carreteras cuenta con la posibilidad de prevenir al conductor ante circunstancias de este tipo (a través de la señalización principalmente).

Sin embargo, las situaciones temporales y que se pueden producir de manera repentina son las verdaderamente difíciles de gestionar y controlar puesto que es complicado prever cuando se van a producir. Sin embargo, existen sistemas de control que tratan de evitar que este tipo de situaciones imprevistas y que generan peligros potenciales se produzcan o que de producirse se minimicen sus consecuencias.

Los principales mecanismos con los que se cuentan para aumentar la seguridad de la circulación son los siguientes:

2.6.2 Canalización

Es la forma más común de control de vehículos. Lo que se pretende gracias a la canalización es homogeneizar el tráfico mediante la segregación del mismo en categorías de vehículos. Un ejemplo muy claro es la separación por medio de medianas de los dos sentidos que tiene una autopista. Antiguamente todas las carreteras interurbanas eran de doble sentido, sin embargo, con la llegada de las autopistas, y la separación de vías con sentidos diferentes se ha reducido notablemente el número de accidentes en trayectos de larga distancia.

Es importante tener en cuenta una serie de criterios a la hora de canalizar el tráfico. Algunos de ellos son:

- Preferencia para los movimientos principales
- Reducción de áreas de conflicto
- Perpendicularidad en trayectorias que se cruzan
- Control de la velocidad
- Control de los puntos de giro
- Creación de áreas protegidas
- Visibilidad
- Previsión de modificaciones futuras

2.6.3 Comunicación y transmisión de información

El transporte ha evolucionado a lo largo de los años y con el tiempo también lo han hecho los sistemas que son necesarios para el control de las operaciones. Hace años simples sistemas de radio o de señalización eran suficientes para el control de las operaciones, sin embargo, las operaciones requieren sistemas mucho más avanzados de telefonía, radio o teletipo. Hoy en día los estudios que se realizan en el transporte por carretera van encaminados a ser utilizados por sistemas que proporcionan información detallada y al instante a los conductores para tratar de conseguir una mayor fluidez u utilización eficiente de las vías.

Estos sistemas analizan en tiempo real todas las características del tráfico y se las transmiten al instante al conductor para que se pueda anticipar. Ejemplo de esto, es el aumento de utilización de dispositivos GPS o el propio smartphone durante la conducción.

Las autoridades encargadas de la gestión de las carreteras disponen también de sistemas para transmitir información a los usuarios. Ejemplo de ello son los arcos con carteles luminosos que aportan información al usuario que pasa por debajo de ellos.

También es bastante común que las diferentes emisoras de radio incluyan espacios de información acerca del tráfico.

2.6.4 Límites y controles de velocidad

En muchas ocasiones es necesario restringir la velocidad de circulación de los vehículos en determinados lugares.

Cabe destacar que todas las vías asfaltadas por las que se pueda circular cuentan con una limitación de velocidad que no debe ser sobrepasada por norma general (En adelantamientos o para prevenir un accidente puede ser superada). Sin embargo, antes condiciones especiales de la vía como curvas, mal estado de la calzada u obras, el límite de velocidad de la vía puede verse reducido para garantizar la seguridad de aquellos usuarios que vayan a atravesar dicha zona.

Conocer la velocidad que llevan los vehículos en una vía permite saber si el funcionamiento de la circulación está siendo correcto o no. Para ello, la medida de la velocidad es imprescindible y se emplean dos técnicas:

- Medidas de la velocidad instantánea de los vehículos al pasar por un determinado punto
- Medida de la velocidad media de un vehículo durante un tramo de vía determinado, calculando el tiempo que el vehículo necesita para recorrer dicho tramo.

Actualmente para la medida de la velocidad instantánea de los vehículos los dispositivos más utilizados son los detectores. Estos detectores pueden a su vez clasificarse en dos grupos:

- Dispositivos que detectan de manera automática la presencia del vehículo en su totalidad (cámaras de video y lazos de inducción)
- Dispositivos que detectan de manera automática el paso de algún punto del vehículo como puede ser su eje. (detectores puntuales).

-Lazos de Inducción

Se trata de una bobina de cable generalmente enterrado bajo el firme de la calzada que aprovecha sus propiedades electromagnéticas para detectar la velocidad del vehículo. Por cada carril que se pretenda llevar a cabo un control de la velocidad han de colocarse dos lazos.

El funcionamiento de estos lazos de inducción es el siguiente: Por el lazo circula corriente alterna generando un campo magnético alterno y cuando un vehículo pasa por encima actúa como elemento conductor induciendo unas corrientes que modifican su conductancia.

El cálculo de la velocidad del vehículo se hace a través de la distancia que el vehículo tarda en recorrer el espacio entre un lazo y el siguiente.

-Cámaras de vídeo

Consiste en una cámara de vídeo situada a una cierta altura sobre la vía y que graba el paso de los vehículos. A través de esas grabaciones se pueden llevar a cabo estudios posteriores de diferentes tipos: Velocidades, demanda, intensidad, etc.

-Detectores puntuales

Estos sistemas son capaces de detectar el paso de un elemento del vehículo. Normalmente la parte del vehículo que detectan son sus ruedas y por lo tanto también reciben el nombre de "Detectores de eje". Algunos de los más utilizados son:

- Tubos neumáticos
- Cables piezoeléctricos
- Detectores ópticos
- Interceptores

Los sistemas de medición de velocidad anteriormente descritos principalmente son utilizados para obtener información acerca del tráfico para su posterior análisis. Sin embargo, actualmente el sistema más utilizado y que además tiene carácter sancionador es el Radar.

-Radar

Es un aparato que normalmente se encuentra situado en los laterales de la calzada o anclado a los arcos informativos luminosos de las carreteras que llevan incorporada una antena que envía un haz de ondas al vehículo. Estas ondas son reflejadas en él y recibidas de nuevo por el radar. Gracias al efecto Doppler el haz de ondas reflejado tiene una frecuencia diferente al del haz emitido, siendo directamente proporcional la diferencia de frecuencia con la velocidad del vehículo.

2.7 Estudio del transporte mediante aforos

La utilización de aforos a la hora de llevar a cabo un estudio y análisis profundo del tráfico es una de las técnicas más eficientes y la que se ha empleado en el presente trabajo. A continuación, se describe la metodología de los aforos, su utilidad y cómo se emplean.

2.7.1 Objetivo de los aforos

Como se ha venido comentando en los apartados anteriores la base del análisis y estudio del tráfico es la obtención de información. Por lo tanto, para obtener dicha información fundamental, se realizan aforos de tráfico cuya principal finalidad es obtener datos que permitan determinar características de la sección aforada como puede ser la intensidad media o el porcentaje de vehículos ligeros y pesado.

Algunos de los objetivos de la obtención de información a través de los planes de aforos son:

- Comparación objetiva entre unas vías y otras ante los efectos de cualquier actuación sobre ellas.
- Justificación del coste de inversiones en las cuales el tráfico ha influido.
- Estudios de señalización.
- Reasignaciones de tráfico.
- Determinación de las características físicas de una vía
- Obtención de elementos que sirvan como base para una investigación

A través de los datos de los aforos de una determinada vía o sección se pueden obtener variables importantes del tráfico y que ya han sido descritas en los apartados anteriores como pueden ser: La Intensidad Media Diaria (IMD), la composición del tráfico, la demanda, los movimientos de giro, etc.

2.7.2 Tipos de aforos

Existen dos formas fundamentales de realizar aforos: Manual y Automática. Utilizar procedimientos manuales o automáticos para la realización de aforos depende de los medios disponibles con los que se cuente y de las necesidades de información que se precisen.

Es preferible utilizar métodos automáticos cuando:

- Las intensidades son muy elevadas
- Se requiere un conocimiento continuo de la intensidad

En cambio, es preferible utilizar métodos manuales cuando:

- Se pretenden estudiar movimientos de giro
- Se quiere estudiar la composición del tráfico
- Las características de la vía impiden colocar elementos de medición automáticos.

1-Aforos Manuales

El conteo manual es un método para obtener datos de los volúmenes de tráfico que se lleva a cabo por personas que reciben el nombre de “Aforadores de tráfico”. Estos aforadores anotarán el paso de cada vehículo rellenando un impreso especial o sobre unos contadores manuales montados sobre unas bandejas especiales.

Estos aforos son útiles durante periodos cortos de tiempo ya que suministran una información muy completa. Sin embargo, son costosos ya que precisan de un elevado número de personal especializado.

En muchas ocasiones en las que la intensidad horaria es elevada, no es suficiente con un único aforador, sino que se precisa de más de uno. También puede ser necesaria la presencia de más aforadores si se precisa información simultánea de muchos movimientos o de muchos vehículos.

Es aconsejable que no se pase de 800 veh/h por observador. Normalmente los periodos de conteo son reducidos (15 minutos) para que así el aforador pueda recoger en una hora datos de movimientos diferentes.

2-Aforos Automáticos

Este tipo de aforos son realmente útiles cuando las intensidades son muy elevadas y no se requiere el estudio de la composición del tráfico o de movimientos de giro.

Algunos de los equipos que se emplean para realizar estos aforos se coinciden con los descritos en el apartado de “Límites y control de la velocidad” como son los lazos inductivos o los tubos neumáticos. A continuación, se va a ampliar la información de estos y a describir algunos otros dispositivos.

- Lazos inductivos: Se emplean para detectar la presencia y el paso de vehículos. Se pueden instalar de forma temporal o permanente
- Tubos neumáticos: Se recogen los datos “en bruto” eje por eje y por lo tanto se necesita un análisis posterior.
- CAPITOLE: Es un analizador compacto de tráfico que no requiere de ningún sensor adicional. Es un dispositivo muy adecuado para la recogida de todos los datos necesario para el análisis del tráfico.
- Sensor láser infrarrojo: El sensor obtiene la imagen del vehículo y a partir de ella efectúa su clasificación y dimensionado.
- Detector de Ultrasónico e Infrarrojo: Combina ambas tecnologías para llevar a cabo una detección precisa de toda clase de objetos y personas.
- Detector de triple tecnología: Cuentan, clasifican, determinan longitud, miden velocidad, calculan distancia entre vehículos y calculan la ocupación de la vía.

El objetivo principal es el conteo de vehículos que pasan por la calzada, pero como se ha visto muchos de ellos nos pueden aportar más información.

2.7.3 Aforos en zonas urbanas

Las características que presenta el tráfico son muy diferentes dependiendo de la zona donde se estudie. Normalmente en las zonas urbanas o suburbanas los ciclos diarios son más uniformes, la saturación es frecuente, las intersecciones están más próximas y la distribución por sentidos suele ser más equilibrada.

El objetivo de los aforos en las zonas urbanas también es muy diferente del que se persigue en zonas interurbanas. A través de los aforos urbanos se pretende conseguir datos como la Intensidad en la hora punta o que se encaminen al estudio de la solución a un problema determinado.

La uniformidad característica de los ciclos de tráfico urbano permite simplificar los planes de aforos, empleándose estaciones de cobertura aforadas durante 24 o 48 horas con muy pocas estaciones de control permanentes. Además, debido a la baja intensidad de tráfico de los fines de semana, los sábados y domingos muchas veces se excluyen de los planes de aforos urbanos.

Las etapas para elaborar un Plan de Foros urbanos suelen ser las siguientes:

1. Definición del sistema viario que constituye la red a aforar.
2. Establecimiento de al menos una estación permanente para detectar las variaciones del tráfico. En ciudades grande estas estaciones permanentes ascenderán a mínimo 4 que definan los ciclos en: Centro ciudad, Vías de penetración al centro, Vías tangenciales al centro, y Zonas periféricas.
3. Realización de programas de aforos de cobertura, con una duración de 24 o 48 horas, que cubra la totalidad de la red objetivo de estudio. La colocación de este tipo de estaciones deberá hacerse en los tramos de la calle comprendidos entre intersecciones de importancia.

En los núcleos urbanos cada vehículo lleva a cabo movimientos y sigue rutas muy diferentes por ello en muchas ocasiones resulta difícil conseguir la información necesaria, aunque se cuente con los medios necesarios para hacerlo.

Existen movimientos que son prácticamente imposibles de seguir mediante planes de aforo simples. Para casos de estudio más complicado se recurrirá a un mecanismo más costoso como son las encuestas a pie de calle en las que un encuestador pregunta directamente al conductor acerca de la información que desea obtener. Un ejemplo puede ser la anotación del número de matrícula que entra o sale de una intersección.

Para volúmenes de 500 vehículos/hora dos aforadores serían suficientes, entre 500 y 1000 vehículos/hora se utilizarán cintas magnetofónicas y para valores superiores a 1000 vehículos/hora la toma y recolección de datos se torna imposible. En estos casos en los que los valores son muy elevados lo mejor será recurrir a programas informáticos que resuelven el problema de manera sencilla.

En el caso de aforar una intersección, si esta no tiene mucha intensidad de tráfico, lo mejor es recurrir a encuestas a pie de calle. Sin embargo, si la intensidad de la intersección es elevada este método resulta imposible de aplicar.

En las intersecciones las variables que son interesantes de estudiar son:

- Composición del tráfico.
- Intensidad.
- Número y disposición de los ramales.
- Distancia recorrida por los vehículos dentro de la intersección.
- Tiempo que cada vehículo permanece en la intersección.

2.8 Planificación del transporte y de los costes

La Planificación del transporte es un proceso en el que se pueden presentar diferentes problemas y que tiene una serie de procedimientos que pueden variar en función de cómo se plantee dicha planificación o de las necesidades que se deseen satisfacer.

La planificación es llevada a cabo por diversos organismos a muchos niveles. Por lo general suele ser un proceso breve y de índole privada, excepto en casos de empresas privadas que participan en un proyecto de financiación pública.

Cabe destacar que el objetivo principal de la planificación es garantizar un servicio de transporte seguro, conveniente, eficaz, rápido y confiable para todos los usuarios y todo ello por un coste adecuado y razonable.

Sin embargo, durante el proceso de planificación se pueden dar algunos problemas. Uno de los más comunes es definir las características de la demanda.

Para solventar este problema es necesario determinar las fuentes generadoras de tráfico y tratar de cuantificar su capacidad de suministro de viajeros y carga, el número

de vehículos que se van a generar desde esas fuentes y las rutas que dichos vehículos van a seguir una vez salgan de las fuentes generadoras de tráfico.

2.8.1 Etapas de la planificación

El proceso de planificación sigue, por norma general, una serie de etapas que son flexibles en función de las necesidades del proyecto. Dichas etapas son las siguientes:

1. Identificación de la necesidad: Es necesario estudiar las necesidades presentes o futuras para identificar si dichas necesidades son actuales y graves o por el contrario no son tan evidentes y su solución se puede plantear a largo plazo.
2. Metas de la planificación: Es imprescindible determinar unos objetivos para de ese modo, poder determinar cuáles son los medios necesarios con los que se ha de contar para lograr esos objetivos. Fijar una dirección y propósito es fundamental en el proceso de planificación.
3. Objetivos de la planificación: Representan la dirección en la que una sociedad (empresarial, urbana, regional o nacional) desea moverse. Los objetivos sirven para lograr las metas fijadas y los criterios se aplican para cuantificar los objetivos y ver si se han cumplido.
4. Análisis de la demanda: No se puede llevar a cabo la planificación sin antes haber recabado la información necesaria a través de un análisis de la demanda. De este modo se pueden conocer cuáles son las cargas de tránsito que ha de soportar el sistema que, en buena medida, son función del uso del suelo y de la población.
5. Proyecciones: Una vez conocida la demanda, el tráfico se distribuye en rutas y modalidades de transporte. Se llevará a cabo una comparación entre la capacidad actual de la red y su demanda y se determinará si existe un exceso o falta de capacidad por parte de la red. Se efectúa ahora la elección de modalidades. La demanda de tránsito se proyecta a largo plazo y se asignan las nuevas rutas. Finalmente se vuelve a estudiar el exceso o falta de capacidad.
6. Diseño de soluciones: Se consideran todas las soluciones posibles y se desarrollan con más detalle aquellas que resulten más prometedoras. Se determina la modalidad, el diseño, la ubicación de la red, el Nivel de Servicio que se desea dar y el coste que supondrá cada alternativa. Han de tenerse en cuenta las consecuencias sociales y medioambientales de cada alternativa.
7. Evaluación de alternativas: Aquellas que han sido seleccionadas para ser analizadas más detalladamente son evaluadas. Hay que considerar su evolución: Efectividad de cada solución, calcular su coste económico, social y medioambiental y evaluar sus consecuencias significativas. Hay que tener en cuenta la aceptabilidad por parte de la sociedad.
8. Presentación: Existe un Consejo de Planificación al cual hay que presentar los planes que se recomiendan y las alternativas que se han barajado. Es importante incluir en la presentación las distintas fuentes de financiación que se han valorado.

9. Ejecución del plan: Una vez que el plan haya sido aprobado y autorizado se han de establecer los métodos y fuentes de financiación que permitan elaborar los planos y diseños finales, adquirir el terreno y la construcción. Todo ello será previo a la etapa final: La Operación.

Todas las etapas están relacionadas entre sí y es conveniente que exista una coordinación y cooperación estrecha entre ellas. Una buena planificación inicial es fundamental para comprobar si el proyecto es viable o no, evitando en el segundo caso, un gasto innecesario de recursos y tiempo.

2.8.2 Planificación de los costes

El objetivo de la gestión del coste de un proyecto durante el proceso de planificación es estimar, presupuestar, obtener financiación, gestionar y supervisar los costes de modo que se complete el proyecto dentro del presupuesto aprobado.

2.8.2.1 Estimar los costes

Es importante llevar a cabo una estimación de los costes, para conocer cuál es el presupuesto que se va a necesitar para llevar a cabo el proyecto. Existen diferentes técnicas para la estimación de los costes:

- Estimación por analogía: Basar la estimación en proyectos anteriores similares
- Estimación ascendente (Bottom up): Estimar el coste de cada una de las actividades que implica el proyecto para después estimar el coste del proyecto por agregación.
- Estimación por tres valores: Tiene en cuenta el grado de incertidumbre existente en la estimación:

$$C_e = \frac{C_o + 4 \times C_m + C_p}{6}$$

Ecuación 2.8-1 Determinación de los costes de un proyecto por tres valores

Siendo:

C_o = Coste optimista

C_m = Coste más probable

C_p = Coste pesimista

2.8.2.2 Determinar el presupuesto

Una vez estimados los costes, el siguiente paso es determinar el presupuesto. En caso de haber utilizado anteriormente la estimación ascendente, determinar el presupuesto es sencillo a través de la agregación de cantidades.

Es importante hacer una correcta gestión del tiempo donde para cada periodo de tiempo (normalmente semanas en proyectos largos) se asigne el coste que se va a afrontar. De este modo se puede generar una “Línea base de costes” que hace referencia al coste acumulado del proyecto durante toda su planificación y ejecución.

La apariencia de una línea base de costes para un proyecto cualquiera sería la siguiente:

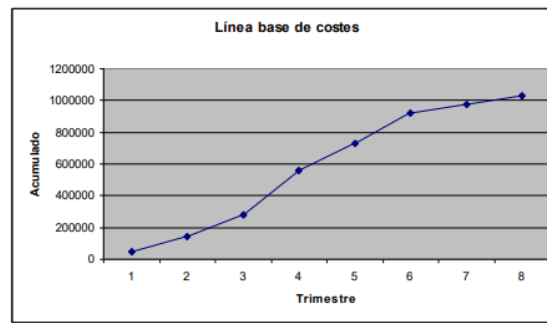


Ilustración 2.8-1 Línea base de costes. Fuente: Dirección de Proyectos D.P.

Dicha línea base de costes ha de conciliar con la estructura de financiación. Asegurándose que la entrada de recursos va a garantizar contar con el presupuesto necesario en cada periodo de tiempo.

2.8.2.3 Controlar los costes

La metodología más utilizada para el control de costes es la del Valor Ganado (EVM) que es una herramienta que trata de combinar las dimensiones de Alcance, Coste y Tiempo. Indicará, en unidades monetarias, el posible retraso o adelanto de las operaciones, así como su infra o sobrecoste.

Antes de definir la metodología es necesario introducir algunas definiciones:

- Coste real (AC): Lo realmente gastado
- Coste Planificado (PV): Lo que se habría gastado si el programa se hubiese ejecutado según lo planificado.
- Valor ganado (EV): Coste presupuestado de lo que realmente se ha hecho.
- Varianza en coste (CV): $CV = EV - AC$
- Varianza en programación (SV): $SV = EV - PV$

Gráficamente estos coeficientes representarían lo siguiente:

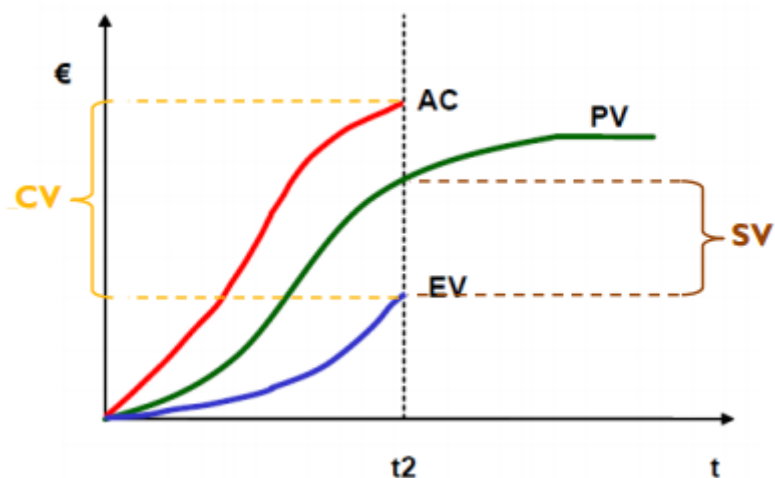


Ilustración 2.8-2 Representación gráfica de los costes de un proyecto. Fuente: Dirección de proyectos D.P.

Cabe destacar que la curva que representa el coste planificado sería la misma que la de la línea base de costes.

Una vez que conocemos los valores de estos factores, se pueden introducir unos índices de eficiencia que mediante la interpretación de su valor podremos obtener información muy relevante acerca del coste del proyecto. Estos índices son los siguientes:

- Índice de eficiencia en costes (CPI): $CPI = EV/AC$
- Índice de eficiencia en programación (SPI): $SPI = EV/PV$

Una vez determinados estos índices podremos interpretarlos de la siguiente manera:

- $CPI = 1$; $EV = AC$. Se ha gastado lo adecuado para lo que se ha hecho
- $CPI < 1$; $EV < AC$. Se ha gastado de más.
- $CPI > 1$; $EV > AC$. Se consigue hacer las cosas “más baratas”.
- $SPI = 1$; $EV = PV$. Lo realizado coincide con lo planificado.
- $SPI < 1$; $EV < PV$. Retraso.
- $SPI > 1$. Adelanto.

Cabe destacar que los índices de eficiencia (CPI y SPI) son valores relativos, mientras que CV y SV son valores absolutos. Por lo tanto, CPI y SPI pueden ser utilizados para comparar proyectos de distintos presupuestos.

El proceso anteriormente descrito de planificación de costes hace referencia a una metodología general que sirve para cualquier tipo de proyecto. A continuación, vamos a analizar los distintos tipos de costes que un Ingeniero de Tráfico se va a encontrar durante la planificación de una red de tránsito.

2.8.2.4 Costes de capital y costes de operación

Los “Costes de capital” hacen referencia a lo que cuesta obtener la planta y el equipo iniciales, así como las ampliaciones y mejoras de dichas instalaciones. Estos costes pueden ser desglosados inversiones en ruta y estructura e inversiones en equipo. Los costes de capital incluyen también los intereses que se pagan por capital invertido.

Los “Costes de operación” son aquellos de manejo del negocio de transporte. Estos se pueden dividir en diferentes categorías:

- Mantenimiento de la ruta: Conservación de las diferentes vías. Conservación y mantenimiento de pavimentos, capas de apoyo, tuberías, etc.
- Mantenimiento del equipo: Conservación del equipo motriz y rodante.
- Costes de transporte: Aquellos en los que se incurre al llevar a cabo el transporte en sí. Combustible, energía, sueldos de los transportistas y de las personas encargadas de la dirección de los vehículos, costes de terminal, etc.
- Costes de control de tránsito: Peajes, aduanas, etc.
- Costes de tráfico: Costes de solicitud de carga, publicidad, publicación de tarifas administrativas.

- Costes generales: Gastos de oficina, asesoría legal y contabilidad. Sueldos de funcionarios generales y su personal.

2.8.2.5 Costes fijos y costes variables

Cualquier coste en el que se incurra durante la elaboración de un proyecto ya sea relacionado con el tráfico o no, puede clasificarse en Fijo o Variable. A continuación, se describirán que costes son fijos y cuales variables en un proyecto relacionado con el tráfico.

- Costes fijos: También llamados costes indirectos, son aquellos que no se ven influenciados por ninguna característica del tráfico (volumen de flujo, intensidad...) De hecho, se puede incurrir en ellos sin que se mueva tráfico alguno.
- Costes variables: También llamados costes directos, son aquellos que varían dependiendo de las condiciones del tráfico.

Ambos tipos de costes están estrechamente relacionados con el tiempo:

- Corto Plazo: Periodo suficientemente corto como para que la capacidad permanezca fija.
- Largo plazo: Periodo suficientemente largo para que se produzcan cambios en la capacidad.

Cabe destacar que, a corto plazo, un aumento del volumen de negocio da lugar al aumento de los costes variables, mientras que a largo plazo un aumento de dicho volumen puede dar lugar a un aumento de los costes de capital fijos y variables.

2.9 Clasificación funcional de las vías urbanas

Un sistema vial urbano desempeña dos funciones principales:

- Proporcionar acceso a los diferentes puntos de interés o propiedades de los usuarios de dicho sistema
- Garantizar la facilidad de relación de las diferentes actividades que se desarrollan en una ciudad. Movilidad de sus habitantes y de cargas.

Las vías urbanas se caracterizan por su multifuncionalidad puesto que son utilizadas por peatones, vehículos privados, vehículos de transporte público, vehículos de reparto y maquinaria de servicio público

Es por ello que dentro de las áreas urbanas aumenta el conflicto entre las funciones de acceso y de circulación debido al gran volumen de vehículos que transitan por ellas. Esto supone a menudo un aumento de los accidentes. Por lo tanto, es necesario que el sistema vial urbano considere prioritaria la reducción o eliminación de dichos accidentes.

En búsqueda de la eficiencia y la economía de la circulación es necesario crear una estructura del sistema vial atendiendo a los criterios de especialización y/o jerarquización de la vía.

Existen dos criterios principales para la clasificación de las vías urbanas:

- Por su actividad: Considerándose la actividad predominante ya que en una misma calle pueden coexistir varias actividades a la vez
- Por su función respecto al tráfico: Hace referencia a las características y a la intensidad del tráfico que utiliza la vía.

En función de su actividad encontramos los siguientes tipos de vías:

- Residenciales: Son aquellas que se encuentran en zonas residenciales y que están transitadas principalmente por vehículos ligero.
- Industriales: Son aquellas que se encuentran en áreas o polígonos industriales. Han de favorecer y permitir el tránsito de vehículos pesados y maquinaria
- Otros usos: Vías parques, calles dotacionales, etc.

La clasificación de las vías por su función respecto al tráfico es mucho más detallada:

-Autopistas y Autovías urbanas

Son aquellas vías que se encuentran solo en las grandes ciudades y que se utilizan para la entrada o salida de vehículos de, las mismas o para circunvalar la ciudad o una zona de ella. Suelen ser vías de alta velocidad con limitación de acceso y con intersecciones a distinto nivel. No deben ser utilizadas por peatones ni por vehículos de baja velocidad y tampoco está permitido el estacionamiento.

-Vías arteriales

Son vías que enlazan entre sí distintas zonas de la ciudad y que conectan la red viaria interurbana con la red viaria urbana. El tráfico que las circula lo hace sin detenerse realizando recorridos superiores a dos kilómetros. Las intersecciones suelen ser semafóricas y al mismo nivel. En ciudades grandes pueden soportar una gran parte del tráfico pesado y en ciudades más pequeñas suelen constituir su red principal.

-Vías colectoras

Constituyen la red de vías que conectan las vías arteriales con la red local de la ciudad. El tráfico suele realizar recorridos cortos que se caracterizan por tener su origen o su destino en calles de esta red. Debe haber zonas que permitan el estacionamiento de los vehículos y deben permitir el acceso a los edificios colindantes. Las intersecciones siempre serán a nivel y con elementos que regulen el tráfico en función de su intensidad (señales, semáforos, preferencias, etc.). Soportan un nivel bajo de flujo de vehículos pesados.

-Vías locales

Constituyen la red de calles utilizadas para recorridos muy cortos y a baja velocidad con origen y destino en las mismas. Si el ancho de la calle lo permite debe permitirse el estacionamiento. Las intersecciones son a nivel y de forma general no suele ser necesario establecer regulaciones especiales en los cruces. El tráfico que soportan en general es ligero.



Ilustración 2.9-1 Autopista. Fuente: Google



Ilustración 2.9-2 Vía arterial. Fuente: Google



Ilustración 2.9-3 Vía colectora. Fuente: Google



Ilustración 2.9-4 Vía local. Fuente: Google

2.10 Movilidad urbana y movilidad peatonal

Debido a que el área de estudio que se va a analizar en los capítulos posteriores corresponde con un área urbana, es necesario describir y citar las características más significativas de la movilidad urbana y peatonal. Por lo tanto en el presente apartado se describen las características principales de la citada movilidad.

2.10.1 Introducción a la movilidad urbana

Hasta ahora todo lo expuesto anteriormente estaba destinado a definir y describir todo aquello relacionado con el tráfico rodado. Sin embargo, en los núcleos urbanos este tipo de tráfico tiene que convivir estrechamente con otro tipo de movilidad que es la movilidad peatonal.

Es por ello, que para cerrar este capítulo se va a dedicar el presente apartado a presentar y describir algunos de los aspectos más significativos de la movilidad peatonal.

Actualmente en las ciudades, con los problemas que están surgiendo a causa de la contaminación y las emisiones las ciudades buscan plantear sistemas de movilidad más sostenibles, enfocándose hacia el peatón y el transporte público.

Transporte público y peatón sea quizá el nexo de unión más próximo entre la movilidad peatonal y el tráfico rodado. Ya que lo que facilita uno le beneficia al otro y viceversa.

La movilidad peatonal surge principalmente por tres fines: Comerciales, administrativos y sociales. Debido a la existencia de centros (centros de las ciudades) donde se concentran la gran mayor parte de servicios y necesidades comerciales hace que en esas áreas y sus proximidades aumente la demanda peatonal.

Hasta ahora la movilidad peatonal se diseñado en función de dos factores:

- Falta de espacio
- Falta de continuidad en el trazado (Se ha priorizado el tráfico rodado)

2.10.2 Nivel de servicio del tráfico peatonal

Para el estudio del Nivel de Servicio de la movilidad peatonal se pueden tener en cuenta numerosos factores que a continuación se van a describir, pero, tres son las variables principales que hay que tener en cuenta:

- Velocidad: Las velocidades de los peatones varían entre 45 y 120 metros/minuto.
- Intensidad: Medida en peatón/metro*minuto.
- Densidad: Medida en peatones por unidad de superficie.

Hay que tener en cuenta que el tráfico peatonal supone el modo fundamental del movimiento urbano y que a diferencia del tráfico rodado hay que tener en cuenta la posibilidad de que exista movimiento sin un fin concreto (Peatones paseando). Es por ello, que la velocidad tendrá que ser toma en cuenta como un parámetro relativo del peatón ya que este no siempre va a desear moverse a la máxima velocidad posible.

Otro aspecto a tener en cuenta es que es un tráfico no canalizado, es decir, que las vías peatonales no están normalizadas ni jerarquizadas ya que tienen diferentes anchuras y la circulación de los peatones por ellas es libre.

Otros aspectos que se deberían tener en cuenta a la hora de analizar el Nivel de Servicio de la movilidad peatonal son:

- Comodidad y protección de los peatones
- Estética
- Conveniencia (Distancias de movimiento, desniveles, cuestas, cruces, etc.)

Un hecho que hace que el Nivel de Servicio de la movilidad peatonal descienda significativamente es la creación de pelotones. Estos pelotones se pueden describir como peatones que circulan agrupados de manera involuntaria. Esto sucede cuando la capacidad de la acera es inferior a la intensidad de peatones.

Con el objetivo de facilitar el entendimiento del concepto de densidad en el caso de los peatones se usa la superficie por peatón en lugar de peatón por unidad de superficie. Esta unidad de superficie por peatón es la que nos dará el nivel de servicio de la vía que se puede dividir en 6 categorías (A, B, C, D, E, F).

Un factor muy interesante que influye en el Nivel de Servicio de una acera es el de "Ancho útil". El ancho útil de una acera es el que queda cuando excluimos de la superficie de la acera unos márgenes poco utilizados por su proximidad a bordillos, fachadas o mobiliario urbano.

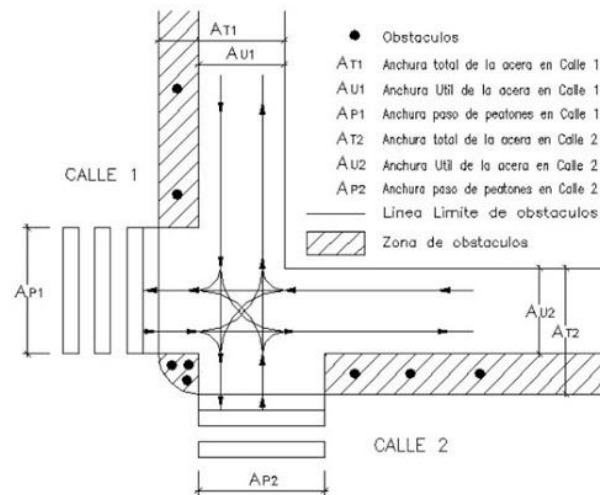


Ilustración 2.10-1 Ancho útil. Fuente: Estudio y accesibilidad urbanística. F.R.L. Pag 13.

2.10.3 Características de los peatones

La principal característica de los peatones es su universalidad. Esto quiere decir que cada peatón tiene características individualizadas y que, por tanto, el entorno de movilidad peatonal debe estar diseñado para ser utilizado por todos sus usuarios potenciales:

- Peatones con movilidad completa.
- Peatones con movilidad reducida (PMR).
- Peatones con carencias auditivas o visuales.

Mientras que el radio que un peatón con movilidad completa que se considera óptimo es de 0,75 metros, una persona en silla de ruedas precisa de un radio de movimiento de 1,5 metros. Por lo tanto, a la hora de planear y diseñar las vías de movilidad peatonal hay que tener en cuenta que ciertos elementos de la acera pueden suponer barreras insalvables para estas personas. Algunas de estas barreras pueden ser:

- Urbanísticas (Bordillos, escaleras, rampas).
- Diseño arquitectónico.
- Uso de medios de transporte (Necesidad de aparcamientos para minusválidos y adaptabilidad en el transporte público).

- Transmisión de información (Rugosidad de los pasos de cebra, semaforización sonora, etc.).

De todo lo anteriormente descrito derivan por tanto una serie de principios de la movilidad peatonal. Algunos de ellos son los siguientes:

- Uso equitativo del espacio de movilidad.
- Flexibilidad en el uso de espacios.
- Uso sencillo e intuitivo.
- Información perceptible para todos los colectivos.
- Diseños robustos con tolerancia al error.
- Minimización de esfuerzo físico.
- Tamaño y espacio adecuados para su uso.

De todo esto también derivan unos derechos peatonales como los siguientes:

- El peatón necesita ciudades diseñadas para los seres humanos y no según las necesidades de los coches, lo que incluye la estética en sus recorridos a pie o en bicicleta.
- Los usuarios con movilidad reducida tienen derecho a garantizar sus movimientos.
- Respeto a los estándares químicos y acústicos.
- Sistemas de transporte público eficientes.
- Zonas verdes y de recreo suficientes y adecuadas.
- Que el trazado de las vías y la circulación por las mismas salvaguarde el tráfico peatonal y ciclista.
- Diseño de ciudad que garantice libertad de movimiento.
- Señalización que tenga en cuenta al peatón.

Algunos elementos que han surgido en los últimos años en las ciudades y que contribuyen a que se garanticen los derechos de los peatones son los “Autobuses peatonales” y las “Supermanzanas”.

Los autobuses peatonales consisten en varios niños que se unen a un grupo monitoreado por personas responsables y que realizan un recorrido determinado o ruta para llegar hasta el colegio.

Las supermanzanas consisten en la agrupación de varias manzanas en una más grande y que tiene prohibido el tráfico rodado en su interior. Algunas de las consecuencias de la instalación de supermanzanas en las ciudades son:

- Aumento de la calidad de vida con una mejora de la cohesión social.
- Recuperación de espacios peatonales y zonas verdes.
- Aumento de la actividad económica ya que cada supermanzana cuenta con servicios y comercios propios.
- Reciclaje urbano enfocado mediante criterios ambientales y sostenibles.

2.10.4 Clasificación funcional de las vías peatonales

Al igual que las vías para vehículos, las vías para peatones o aquellas en las que conviven vehículos y peatones existen varios criterios de clasificación como son los siguientes:

1-Por la anchura de la calle

El ancho de la vía tiene directa relación con la capacidad de tráfico, que suele ser, a su vez determinante para definir importancia y tipo de red en la que se incluye la vía. Dentro de esta clasificación los tipos de vía que existen son:

- Calles estrechas: Todas aquellas que cuenten con un ancho total (medido entre las edificaciones contiguas) que no superen los 8 metros.
- Calles medias: Aquellas en las que su ancho total se encuentre entre 8 y 20 metros.
- Calles anchas: Aquellas en las que su ancho total sea superior a los 20 metros.

2-Por el tipo de tráfico que soporta

La clasificación se lleva a cabo en función del tipo de tráfico o de los usuarios que las utilizan.

- Monomodales: Admiten un único tipo de tráfico
- Plurimodales: Concurren diversos tipos de usuarios y se puede distinguir si existe segregación total, parcial o nula entre los diferentes usuarios o entre algunos de ellos

3-Por el conjunto o núcleo urbano donde está situada la calle

Este criterio se basa en las características urbanas de la zona donde está situada la calle. Existen un gran número de posibles criterios de agrupación por lo que a continuación se exponen los más comunes.

- Calles en núcleos históricos: Se trata de calles situadas en zonas antiguas de la ciudad en muchos casos de época medieval con calles estrechas y trazado irregular.
- Calles en núcleos tradicionales: Son calles análogas a las del punto anterior, pero sin la presencia de monumentos históricos. Suelen corresponder a núcleos rurales muy antiguos.
- Calles en zonas de ensanche: Se corresponden con aquellas calles que se construyeron en las zonas denominadas de ensanche en las ciudades. Son calles que responden a un criterio de cuadrícula con anchos de calle elevados.
- Calles en barrios nuevos: Se trata de barrios construidos a partir de los años 70 y 80 en las zonas de ampliación de las ciudades. Los criterios urbanísticos se basan en disponer de amplios espacios verdes, grandes avenidas con bulevar y red viaria con forma de cuadrícula.





CAPÍTULO 3 EMISIONES CONTAMINANTES

3.1 Introducción

El continuo crecimiento de las ciudades ha llevado implícito el crecimiento del número de vehículos que circulan por ellas hasta llegar a un punto, que es en el que nos encontramos actualmente en el que las ciudades no pueden soportar un mayor volumen de tráfico por varios motivos.

Como se comentaba en apartados anteriores las vías de las ciudades ofrecen a los usuarios una determinada capacidad que, en muchas ocasiones es imposible aumentar debido a las condiciones físicas de la vía y de su entorno. Por lo tanto, si el volumen de flujo de tráfico supera dicha capacidad las vías se verán colapsadas y por lo tanto la ciudad se convertirá en un lugar incómodo donde circular.

Sin embargo, la superación de la capacidad que ofrecen las ciudades para el tráfico no es el efecto más nocivo resultante del aumento del número de vehículos que circulan por las ciudades. Actualmente existe un problema medioambiental grave debido a las emisiones contaminantes que los vehículos producen.

La emisión de gases de efecto invernadero por parte de los vehículos se está convirtiendo en el principal problema sobre el que Administraciones y Ayuntamientos enfocan sus esfuerzos y recursos ya que estos gases no solo afectan al medio ambiente, sino que también afectan y de forma directa a la salud de las personas.

Según un estudio publicado por el European Heart Journal el número de muertes prematuras que se producen al año a causa de la contaminación del aire es de 8,8 millones de personas en el mundo. En Europa, añade el estudio, se producen en torno a 790.000 muertes anuales debido a este factor.

Centrándonos en los datos de España, según la Sociedad Española de Neumología y Cirugía Torácica (Separ) la contaminación del aire causa 10.000 muertes al año en España.

Los gases más nocivos para la salud son entre otros: Los óxidos de nitrógeno (NO_2), las partículas en suspensión, el ozono troposférico, el dióxido de azufre, el monóxido de carbono, el plomo, etc.

Si bien es cierto que el tráfico rodado no es el único factor que afecta a la calidad del aire, sí que es uno de los mayores responsables. En Europa se estima que el 32,5% de las emisiones contaminantes son debidas a los gases emitidos por los tubos de escape, seguido muy de cerca por las plantas industriales con un 32,4%.

Con estos datos parece razonable que los Ayuntamientos y Administraciones de las ciudades de España se planteen medidas que traten de reducir el impacto que el tráfico genera en el medio ambiente y de este modo mejorar la calidad del aire que respiran sus vecinos y que afecta directamente a su salud.

Es por ello, que en el presente proyecto se van a modelar y analizar los efectos que tienen sobre la cantidad de emisiones generadas algunas de las medidas que el

Ayuntamiento de Valladolid pone en marcha en días donde la contaminación del aire está por encima de los límites permitidos.

3.2 Gases producidos por los vehículos

Como se ha citado anteriormente el objetivo principal del presente trabajo es analizar los gases contaminantes producidos por los vehículos. Es por tanto necesario describir cuáles son estos gases y cuál es el impacto que producen al ser emitidos.

3.2.1 Tipos de gases

Son muchos los gases que un vehículo expulsa por su tubo de escape durante su funcionamiento. Si bien es cierto que los más conocidos y perjudiciales son el dióxido de carbono (CO_2) y los óxidos de nitrógeno (NO_x) hay otros muchos gases expulsados por los vehículos como el monóxido de carbono (CO), hidrocarburos no quemados (HC), compuestos de plomo, anhídrido sulfuroso y partículas sólidas.

Se debe tener en cuenta que en función de si el vehículo es diésel o gasolina la composición y el porcentaje de cada uno de los gases que emite el vehículo son diferentes.

En el caso de los vehículos de gasolina cabe destacar que el principal gas que emiten es el monóxido de carbono (CO) seguido de los óxidos de nitrógeno, hidrocarburos y compuestos de plomo.

Por otro lado, los vehículos diésel, que han tenido un gran auge en los últimos años por los mayores rendimientos y menores consumos que estos motores proporcionan al vehículo, emiten gases que proceden del azufre que el gasoil contiene en su composición como son los anhídridos sulfurosos. Otra particularidad de este tipo de vehículos es que emiten partículas sólidas en forma de hollín o polvo que dan lugar a humos negros.

Para que se produzca la combustión en el interior del motor es necesario suministrarle aire. Dicho aire está compuesto principalmente por dos gases que son el nitrógeno (N_2) y el oxígeno (O_2). Normalmente la composición de este aire se encuentra en torno al 79% de N_2 y un 21% de O_2 aproximadamente.

El nitrógeno durante la combustión se combina en una pequeña proporción para formar los óxidos de nitrógeno (NO_x) pero en su mayor parte no se combina con nada y es expulsado sin ninguna modificación. Sin embargo, el oxígeno resulta fundamental para la formación de una gran cantidad de gases que son expulsados. A continuación, se muestra una representación aproximada de la composición de los gases expulsados por vehículos diésel y vehículos gasolina.

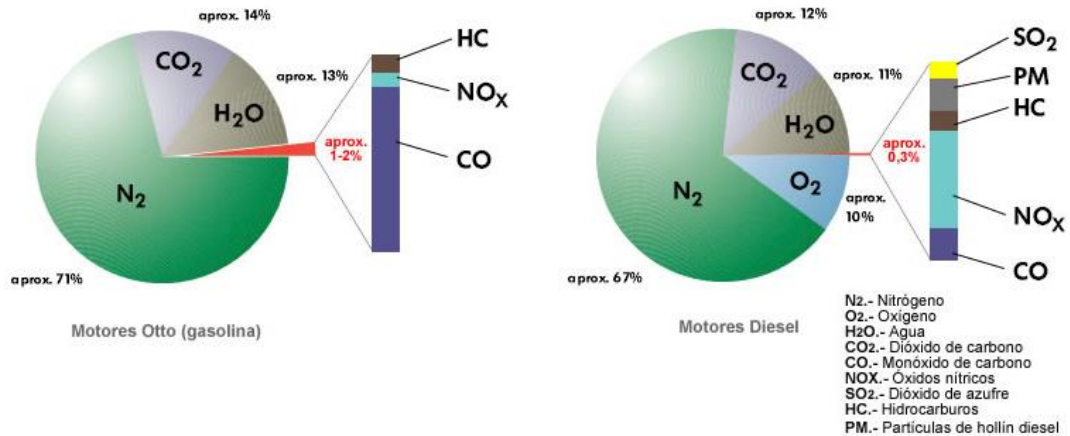


Ilustración 3.2-1 Gases emitidos por los vehículos en función del combustible. Fuente: Aficionados a la mecánica.net

Se puede apreciar que el porcentaje de gases contaminantes no es muy elevado en proporción al resto de gases que se emiten durante la combustión, sin embargo, este dato puede resultar engañoso debido a que a pesar de su bajo porcentaje son muy perjudiciales.

A continuación, se van a describir algunos de los gases que generan mayor impacto en el medio ambiente:

- Monóxido de Carbono (CO):** Como se comentaba anteriormente es un gas que principalmente lo emiten los vehículos con motores gasolina. La emisión de este gas es producida por un proceso de combustión incompleto que se puede producir por un exceso de combustible o por escasez de oxígeno en la mezcla. Se puede considerar uno de los gases más perjudiciales para el ser humano puesto que si se inhala puede llegar a ser muy tóxico debido a que esta molécula desplaza a las de O₂ en la sangre. Cabe destacar que, a pesar de ser altamente tóxico, en una concentración normal en el ambiente se oxida formando CO₂.
- Dióxido de Carbono (CO₂):** Se produce más cantidad en los motores gasolina. Aunque en grandes cantidades es muy perjudicial debido a que provoca el efecto invernadero, elevando la temperatura del planeta y desequilibrando el ciclo natural, en concentraciones medias se encuentra de forma natural en la atmósfera. Cabe destacar que debido a que es fundamental para el proceso de fotosíntesis de las plantas y para el mantenimiento de la temperatura de la Tierra se encuentra en el aire que respiramos.
- Óxidos de Nitrógeno (NO_x):** Cabe destacar que aproximadamente un 75% del NO₂ que se encuentra en el ambiente de las zonas urbanas es provocado por el tráfico rodado. Normalmente se producen en mayor cantidad en los motores diésel, sin embargo, actualmente los fabricantes de motores de gasolina buscan aumentar el rendimiento y reducir el consumo de este tipo de motores, para ello se emplean los motores de inyección directa que trabajan con relaciones de compresión altas y mezclas no estequiométricas, por lo tanto, la presencia de NO_x en este tipo de motores es cada vez más usual. Su denominación NO_x se debe a que existen varios tipos: El NO y el NO₂ normalmente se oxidan con el

oxígeno del aire formando moléculas de NO_3 que son muy peligrosas ya que pueden formar ácido nítrico en combinación con el hidrógeno presente en la atmósfera. También es posible que se formen moléculas de N_2O que son muy dañinas debido a que destruyen el ozono y provocan el efecto invernadero, además son muy estables y longevas (170 años de ciclo de vida).

- Óxidos de Azufre (SO_x): Se producen en mayor cantidad en los motores diésel y aunque actualmente su producción se ha visto notablemente reducida debido a los procesos de “desulfuración” en la destilación de los combustibles, su efecto es muy nocivo ya que son los principales causantes de la lluvia ácida. En concreto el dióxido de azufre (SO_2) afecta a la salud de las personas provocando enfermedades de las vías respiratorias.
- Hidrocarburos (HC): Suelen ser hidrocarburos que no se han quemado o que se han quemado parcialmente. Son comunes en ambos tipos de motores (gasolina y diésel) y afectan a las personas ya que son tóxicos y provocan irritaciones en ojos, piel y pulmones. Uno de los más peligrosos es el benceno que es cancerígeno.
- Partículas de hollín (PM): Su denominación PM proviene del inglés *particulate matter* seguido del valor de su diámetro (PM10, PM2,5). Su origen puede ser primario y secundario. Se considera que su origen es primario cuando las PM se emiten directamente a la atmósfera como consecuencia de la combustión de los motores, el desgaste de frenos y neumáticos, otros procesos industriales y la construcción. Por otro lado, se considera que el origen de las PM es secundario cuando se producen en la atmósfera como resultado de reacciones químicas a partir de ciertas moléculas precursoras (SO_2 , NO_x , NH_3).

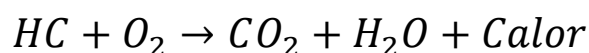
Como se puede apreciar en la imagen anterior no todos los gases que emiten los tubos de escape de los vehículos son perjudiciales, algunos como el nitrógeno (N_2), el oxígeno (O_2) o el agua (H_2O) no causan efectos nocivos en el medio ambiente.

3.2.2 Tipos de combustión

Normalmente la razón por la cual los vehículos contaminan es debido a tanto la gasolina como el gasoil que emplean contienen impurezas que no se queman o lo hacen solo parcialmente durante la combustión y se convierten en los gases contaminantes que se han descrito anteriormente.

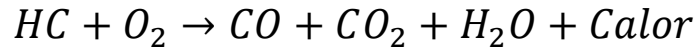
Se pueden distinguir por lo tanto dos tipos de combustiones: Completa e Incompleta:

- Combustión completa: En un proceso de combustión completa cada molécula de carbono se une a dos moléculas de oxígeno por lo que los gases que resultan del proceso son menos contaminantes.



Ecuación 3.2-1 Combustión completa

- **Combustión incompleta:** Un proceso de combustión se considera incompleto cuando parte del combustible no reacciona debido a que el aporte de oxígeno es insuficiente. En este caso algunos de los átomos de carbono se combinan con un solo átomo de oxígeno formando monóxido de carbono (CO) y otros subproductos nocivos.



Ecuación 3.2-2 Combustión incompleta

3.3 Efectos de los gases contaminantes

Los gases descritos anteriormente pueden afectar de diferentes maneras. Sin embargo, es el medio ambiente y la salud de las personas los ámbitos que se ven más perjudicados por el fenómeno de la contaminación. A continuación, se van a describir dichos efectos nocivos.

3.3.1 Efectos sobre el medio ambiente

- **Efecto invernadero**

Una vez descritos los diferentes gases que expulsan los vehículos como resultado de la combustión de la gasolina o el gasoil es preciso determinar cómo estos gases afectan a nuestra salud y al medio ambiente y que fenómenos están causados por la emisión de dichos gases.

Uno de los principales fenómenos de los cuales las emisiones de los vehículos son las causantes es el llamado “Efecto Invernadero”.

El denominado efecto invernadero, también conocido como calentamiento global consiste en el sobrecalentamiento de la superficie terrestre y de las capas bajas de la atmósfera. Los gases de efecto invernadero crean una capa que impide que la radiación solar escape hacia el exterior quedando atrapada y produciendo un aumento progresivo de la temperatura terrestre.

En concreto los gases de efecto invernadero son inocuos y en pequeñas proporciones es normal encontrarlos en la atmósfera ya que entre otras cosas son los encargados de mantener la temperatura de la tierra, pero en proporciones mucho mayores son muy nocivos ya que provocan un sobrecalentamiento de la tierra.

Gases como el CO₂, el ozono superficial (O₃), el óxido nitroso (N₂O) entre otros que se describirán posteriormente, se acumulan en la atmósfera como resultado de las actividades desarrolladas por el hombre entre las que destacan el transporte. Esto provoca el calentamiento global debido a que los gases acumulados frenan la pérdida de radiación infrarroja (calor) desde la tierra al espacio. Este calor que se acumula es transmitido a los océanos, lo que implica un aumento generalizado de la temperatura de la tierra.

En la siguiente imagen puede observarse de manera gráfica como se produce el efecto invernadero:

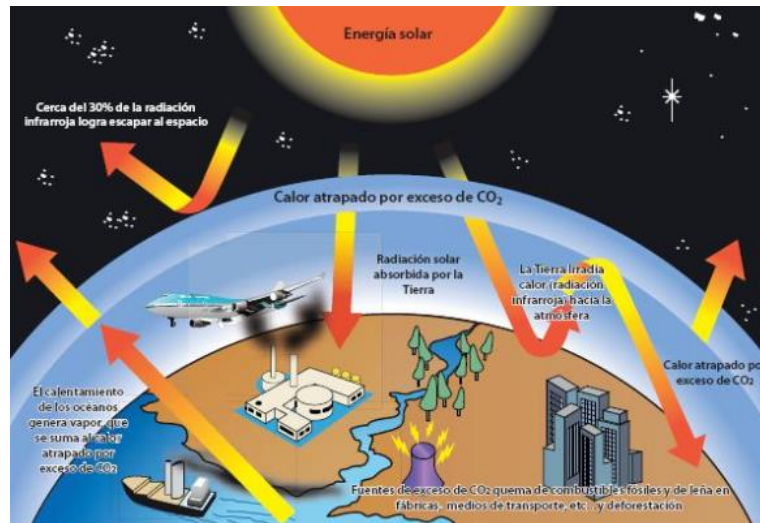


Ilustración 3.3-1 Representación gráfica del efecto invernadero. Fuente: CIIFEN

La revista National Geographic señala que los efectos del calentamiento global ya se están viendo y que de no llevar a cabo medidas drásticas para frenar la emisión de gases de efecto invernadero dichos efectos se agudizaran en un futuro no muy lejano. Algunos de los efectos que este fenómeno está causando y que la revista señala son:

- El hielo se derrite en todo el mundo. Especialmente preocupantes son el deshielo en los dos polos, la zona oeste de la Antártida y Groenlandia
- Aumento significativo del nivel del mar
- La media de las precipitaciones ha aumentado en todo el globo
- Inundaciones y sequías más frecuentes
- Emigración de diversas especies hacia zonas más frías.

Sin embargo, el único responsable del calentamiento global no es el transporte rodado, pero si uno de los más importantes. A continuación, se va a describir de una manera más concreta cuales son los efectos que se atribuyen directamente a las emisiones vehiculares.

Según el Parlamento Europeo el transporte es el responsable del 30% de las emisiones de CO₂ en la Unión Europea y como hemos visto el CO₂ es el principal responsable del calentamiento global. De este 30%, se estima que un 72% corresponde al transporte por carretera.

A continuación, se muestra en una gráfica elaborada por la Agencia Europea de Medio Ambiente el porcentaje de emisiones de CO₂ en la Unión Europea que le corresponde a cada sector:

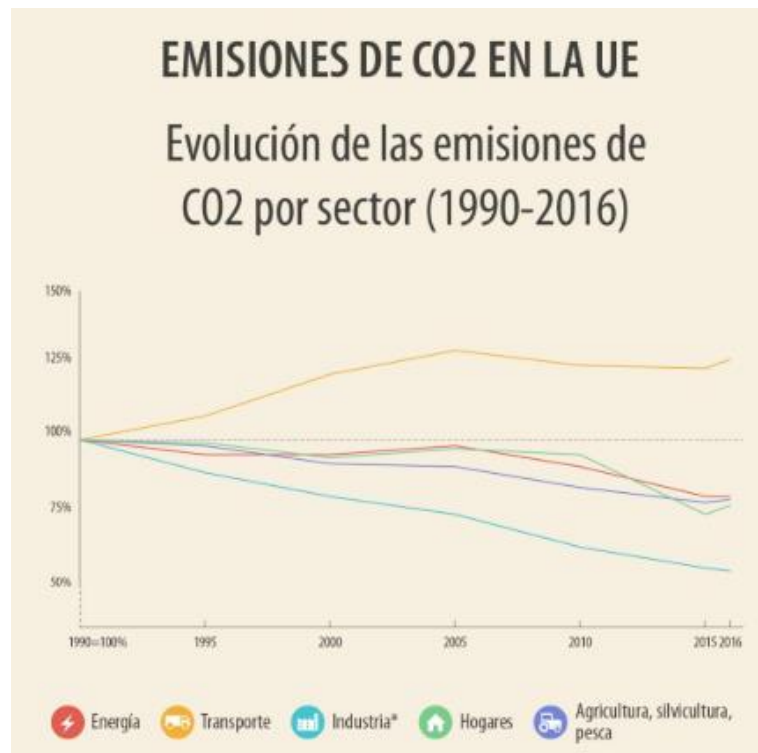


Ilustración 3.3-2 Evolución de las emisiones emitidas por cada sector en la UE. Fuente: Agencia europea de medio ambiente

De dicho gráfico se pueden obtener dos conclusiones: la primera es que el transporte es el principal generador de CO₂, y la segunda es que es el único sector que tiene una tendencia ascendente. Vemos como el sector de la industria o la energía han tenido una evolución descendente en los últimos años.

Dentro de todo el sector del transporte las emisiones de CO₂ varían en función del tipo de medio de transporte que se analice. Sin embargo, el coche es el más contaminante de todos suponiendo un 60,7% del total de las emisiones generadas por el transporte rodado en Europa.

En el siguiente gráfico elaborado por la Agencia Europea de Medio Ambiente se puede ver que porcentaje de emisiones de CO₂ le corresponde a cada medio de transporte en Europa:

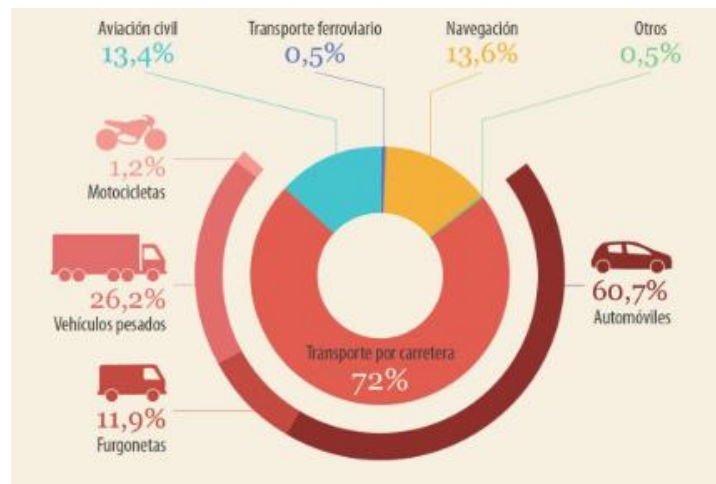


Ilustración 3.3-3 Porcentaje de emisiones emitido por cada tipo de transporte. Fuente: Agencia europea de medio ambiente

La información se corresponde con un estudio realizado en 2016 sin embargo, se puede considerar que los datos no hayan variado mucho hasta la actualidad debido a que se siguen utilizando los mismos medios de transporte y en las mismas proporciones.

De todas las emisiones de CO₂ emitidas por medios de transporte en Europa un 72% le corresponde al transporte rodado y dentro de dicho transporte un 60,7% es debido a los coches. Analizando estos datos parece razonable que las diferentes administraciones pretendan reducir todo lo que se pueda el uso de coches en las ciudades.

- **Lluvia ácida**

Otro de los fenómenos medioambientales resultante de la emisión de gases es la conocida como “Lluvia Ácida”. Por lluvia ácida se entiende a cualquier tipo de precipitación que en su composición presente elevadas concentraciones de ácido sulfúrico y nítrico.

Si bien es cierto que algunos fenómenos naturales como la erupción de los volcanes o la descomposición de la capa vegetal emiten algunos químicos a la atmósfera que pueden contribuir a que se origine la lluvia ácida, su responsabilidad al respecto es muy pequeña en comparación con la de la acción humana. La quema de combustibles fósiles en la industria energética, las fábricas y las emisiones vehiculares son los principales causantes de este fenómeno.

Algunos gases emitidos por los vehículos como el dióxido de azufre (SO₂) o los óxidos de nitrógeno (NO_x) reaccionan con el agua y el oxígeno de la atmósfera formando soluciones diluidas de ácido nítrico y sulfúrico provocando que cuando llueve, dicha lluvia arrastra estas partículas hacia la Tierra y haciendo que fluya hacia acuíferos y suelos de cultivo.

Entre las muchas consecuencias nocivas derivadas de la lluvia ácida, la más nociva de todas es la que se corresponde con el efecto que esta lluvia causa sobre los medios acuáticos. La lluvia ácida provoca que se eleve el nivel ácido de los acuíferos provocando

que se posibilite la absorción de aluminio. Esta combinación hace que se eleve la toxicidad de las aguas y que afecte directamente a la fauna que en ellas habita.

Otro efecto nocivo es el provocado sobre los bosques y selvas. Este tipo de precipitación libera aluminio en el suelo y roba nutrientes esenciales para la flora de ellos lo que dificulta la absorción de agua por parte de las plantas y árboles.

El principal causante de este fenómeno es la quema de combustibles fósiles, por lo tanto, algunas de las medidas que se llevan a cabo para frenar este tipo de precipitación es la limpieza de chimeneas industriales, la reducción del tráfico rodado y la promoción de combustibles alternativos.

3.3.2 Efectos sobre la salud de las personas

En este apartado se va a analizar independientemente cada uno de los gases emitidos por los coches analizando como afectan independientemente sobre la salud de las personas. La información que a continuación se va a detallar es la que aporta el Ministerio de Transición Ecológica:

- Óxidos de Nitrógeno (NO_x): En concreto el dióxido de nitrógeno (NO₂) es el que tiene efectos nocivos sobre la salud de las personas. Los efectos adversos que el NO₂ produce pueden ser de diferente naturaleza, entre los más destacados se encuentran: Inflamación de las vías respiratorias, afecciones del hígado o el bazo y afecciones del sistema circulatorio o inmunitario que provoca infecciones pulmonares e insuficiencias respiratorias.
- Monóxido de Carbono (CO): La manera que el CO tiene de penetrar en el organismo es a través de los pulmones provocando disminuciones del transporte del oxígeno en la sangre, lo que provoca que la cantidad de oxígeno que llega a órganos y tejidos también disminuya. Otros efectos de la inhalación de CO son disfunciones cardíacas, daños en el sistema nervioso y mareos.
- Dióxido de Azufre (SO₂): Es uno de los más nocivos y es que incluso a vario kilómetros de distancia del foco emisor puede producir efectos muy nocivos. Los efectos que provoca sobre las personas son: Irritación e inflamación del sistema respiratorio, afecciones pulmonares, alteración del metabolismo de las proteínas y dolores de cabeza.
- Material Particulado (PM_x): Su denominación se basa en el diámetro en micras de dichas partículas, así las de 10 micras se denominan PM10 y las de menor tamaño PM2,5. La peligrosidad de estas partículas reside en la posibilidad que estas tienen de penetrar en los alveolos pulmonares, llevando sustancias muy nocivas a zonas muy sensibles de nuestro organismo, agravando patologías ya existentes. Por lo tanto, las partículas pueden estar implicadas en el incremento de la mortalidad por causas respiratorias y cardiovasculares. También existen partículas ultrafinas (UFP) que pueden incluso llegar al flujo sanguíneo afectando a diversos órganos.

A continuación, se muestra una tabla donde aparecen los valores recomendados por la OMS para las emisiones anteriormente descritas:

VALORES RECOMENDADOS POR LA OMS			
CONTAMINANTE	VALOR	UNIDAD	PERIODO
NO ₂	40	µg/m ³	Media anual
	200		Media en 1 hora
SO ₂	20		Media en 24 horas
	500		Media en 10 minutos
PM10	20		Media anual
	50		Media en 24 horas
PM2,5	10		Media anual
	25		Media en 24 horas

Tabla 3.3-1 Valores recomendados por la OMS para los principales contaminantes del transporte. Fuente: Ministerio para la transición ecológica.

3.4 Normativa sobre calidad del aire

Dado que, como se ha visto anteriormente, las emisiones gaseosas de los vehículos son tan perjudiciales existe una normativa europea y española que rige sobre la calidad del aire. A continuación, se van a exponer algunas de las normas y directivas más importantes.

3.4.1 Normativa europea

La calidad del aire en Europa está controlada y regida por las siguientes normas:

- Directiva 2008/50/CE: del Parlamento Europeo y del Consejo (21/05/2008), es relativa a la calidad del aire ambiental y a generar una atmósfera más limpia en el continente europeo. Esta Directiva completa a las anteriores ya existentes introduciendo regulaciones para nuevos contaminantes (partículas de diámetro inferior a 2,5 µm), así como nuevos requisitos para la evaluación de la calidad del aire, teniendo muy presente las directrices marcadas por la OMS.
- Directiva 2004/107/CE: del Parlamento Europeo y del Consejo (15/12/2004), relativa a los elementos químicos mercurio, níquel, arsénico y cadmio, así como a los hidrocarburos presentes en el aire ambiente. Es la única norma que deriva de la Directiva Marco original que actualmente sigue en vigor. Esta Directiva establece valores objetivo para el arsénico, el benceno, el cadmio y el níquel (se exceptúa el mercurio) de concentración el aire ambiente que no han de sobrepasarse. Con esta Directiva se pretende evitar o al menos reducir los efectos perjudiciales que estos contaminantes causan sobre el medio ambiente y sobre la salud de las personas. Los valores objetivo que ha establecido el Parlamento Europeo son los siguientes:

Valores objetivo del arsénico, níquel cadmio y benzo(a)pireno	
CONTAMINANTE	VALOR OBJETIVO (*)
Arsénico	6 ng/m ³
Cadmio	5 ng/m ³
Níquel	20 ng/m ³
Benzo(a)pireno	1 ng/m ³

(*) Referente al contenido total en la fracción PM₁₀ como promedio durante un año natural

Tabla 3.4-1 Valores objetivo del arsénico, níquel, cadmio y benzeno(a) pireno. Fuente: Ministerio para la transición ecológica

- Directiva 2015/1480/CE: de la Comisión (28/08/2015) por la que se modifican algunos de los anexos de las dos Directivas anteriores. Con fecha 12/12/2011 se aprobó la Decisión 2011/850/UE que establece que los Estados miembros de la Unión Europea han de facilitar la información sobre el sistema de evaluación que va a aplicarse en el año civil siguiente respecto a cada contaminante en cada zona y aglomeración.

3.4.2 Normativa española

La legislación europea actualmente en vigor relativa a la calidad del aire viene descrita por las siguientes normas:

- Ley 34/2007 del 15 de noviembre sobre calidad del aire y protección de la atmósfera. Esta Ley actualiza la base legal para los desarrollos relacionados con el control y la gestión de la calidad del aire en España. Su principal objetivo es alcanzar unos niveles de calidad del aire que aseguren evitar, prevenir y reducir los efectos negativos sobre la salud humana, medio ambiente y demás bienes de cualquier naturaleza. Esta Ley también habilita al gobierno para definir y establecer los objetivos y los métodos de evaluación de la calidad del aire.
- Real Decreto 102/2011 del 28 de enero sobre la mejora de la calidad del aire. Este Real Decreto se encarga de trasladar al ordenamiento jurídico español el contenido de la normativa europea anteriormente citado: Directiva 2008/50/CE y la Directiva 2004/107/CE. Este Real Decreto establece los valores límite para la protección de la salud para los distintos contaminantes.

A continuación, se resumen en una tabla los valores establecidos por el Real Decreto 102/2011:

VALOR LÍMITE PARA LA PROTECCIÓN DE LA SALUD HUMANA				
EMISION	VALOR	UNIDAD	PERIODO	NORMA
NO ₂	200	µg/m ³	Valor medio en 1 hora	No superarse en más de 18 veces por año
SO ₂	350	µg/m ³	Valor medio en 1 hora	No superarse en más de 24 veces por año
CO	10	mg/m ³	Máximo diario octohorario anual	X
PM10	50	µg/m ³	Valor medio en 24 horas	No superarse en más de 35 veces por año
PM2,5	25	µg/m ³	Año natural civil	X

Tabla 3.4-2 Valores límite para la protección de la salud humana según el Real Decreto 102/2011. Fuente: Ministerio para la transición ecológica

Esta norma también establece la determinación de los requisitos necesarios para la evaluación de las concentraciones de estos gases. A continuación, se resumen los umbrales superior e inferior de evaluación:

-Dióxido de azufre (SO₂)

	PROTECCIÓN DE LA SALUD	PROTECCIÓN DE LA VEGETACIÓN
Umbral superior de evaluación	60% del valor límite diario (75µg/m ³ que no podrán superarse en más de tres ocasiones por año civil)	60% del nivel crítico de invierno (12µg/m ³)
Umbral inferior de evaluación	40% del valor límite diario (50µg/m ³ que no podrán superarse en más de tres ocasiones por año civil)	40% del nivel crítico de invierno (8µg/m ³)

Tabla 3.4-3 Umbrales de evaluación para el SO₂. Fuente: Ministerio para la transición ecológica

-Dióxido de nitrógeno (NO₂) y óxidos de nitrógeno (NO_x)

	Valor límite horario para la protección de la salud humana (NO ₂)	Valor límite anual para la protección de la salud humana (NO ₂)	Nivel crítico anual para la protección de la vegetación y ecosistemas (NO _x)
Umbral superior de evaluación	70% del valor límite (140µg/m ³ que no podrán superarse en más de 18 ocasiones por año civil)	80% del valor límite (32µg/m ³)	80% del nivel crítico (24µg/m ³ expresado como NO ₂)
Umbral inferior de evaluación	50% del valor límite (100µg/m ³ que no podrán superarse en más de 18 ocasiones por año civil)	65% del valor límite (26µg/m ³)	65% del nivel crítico (19,5µg/m ³ expresado como NO ₂)

Tabla 3.4-4 Umbrales de evaluación para el NO₂ y los NO_x. Fuente: Ministerio para la transición ecológica.

-Partículas (PM10 y PM2,5)

	Media diaria PM10	Media anual PM10	Media anual PM2,5
Umbral superior de evaluación	70% del valor límite (35µg/m ³ que no podrán superarse en más de 35 ocasiones por año civil)	70% del valor límite (28µg/m ³)	70% del valor límite (17µg/m ³)
Umbral inferior de evaluación	50% del valor límite (25µg/m ³ que no podrán superarse en más de 35 ocasiones por año civil)	50% del valor límite (20µg/m ³)	50% del valor límite (12µg/m ³)

Tabla 3.4-5 Umbrales de evaluación para las PM10 y las PM2,5. Fuente: Ministerio para la transición ecológica

-Monóxido de carbono (CO)

	Promedio de periodos de 8 horas
Umbral superior de evaluación	70% del valor límite (7mg/m ³)
Umbral inferior de evaluación	50% del valor límite (5mg/m ³)

Tabla 3.4-6 Umbrales de evaluación para el CO. Fuente: Ministerio para la transición ecológica

Para la obtención de todos estos datos es necesario colocar puntos de muestreo que permitan la medición fija de las concentraciones de estos gases. La norma que se está tratando en este apartado también establece el número mínimo de puntos de muestreo que han de tener las ciudades en función de su población. A continuación, se muestra en una tabla los puntos de medida necesarios para obtener datos fiables para los distintos volúmenes de habitantes:

Población de la zona en miles de habitantes	Si las concentraciones superan el umbral superior		Si las concentraciones máximas se encuentran entre el umbral superior e inferior	
	Contaminantes (Excepto partículas)	Suma de PM10 y PM2,5	Contaminantes (Excepto partículas)	Suma de PM10 y PM2,5
0 - 249	1	2	1	1
250 - 499	2	3	1	2
500 - 749	2	3	1	2
750 - 999	3	4	1	2
1000 - 1499	4	6	2	3
1500 - 1999	5	7	2	3
2000 - 2749	6	8	3	4
2750 - 3749	7	10	3	4
3750 - 4749	8	11	3	6
4750 - 5999	9	13	4	6
>5999	10	15	4	7

Tabla 3.4-7 Puntos de muestreo necesarios en función de la población. Fuente: Ministerio para la transición ecológica

3.5 Normativa europea sobre emisiones de vehículos: EURO

Es necesario enmarcar el presente trabajo y todo lo que en él se analiza y describe dentro de la normativa vigente para poderlo contextualizar y entender de una mejor manera. En el presente apartado se lleva a cabo una descripción de las principales leyes y reglamento que regulan las emisiones de los vehículos que circulan por Europa y por España.

3.5.1 Introducción a la norma EURO

La normativa europea EURO es una normativa europea sobre emisiones que persigue desde hace muchos años evitar que aumente la contaminación del aire. Esta normativa se creó en la UE en 1988 y desde ese momento ha tenido diversas actualizaciones que establecen valores máximos sobre las emisiones contaminantes que pueden emitir los vehículos que se fabrican y se comercializan en los países miembros de la UE. La primera norma Euro se creó en 1988 y se denominó como Euro 0, desde entonces se han creado seis normas Euro más. Actualmente está en vigor la norma Euro 6 y se espera que en 2020 entre en vigor la norma Euro 7.

A medida que se ha ido modificando la norma Euro, esta se ha ido haciendo más exigente en cuanto a las emisiones que pueden emitir los coches que se fabrican. Estas normas normalmente establecen pautas de obligado cumplimiento por parte de los fabricantes que afectan sobre todo a ciertas partes de los vehículos como, por ejemplo: Los filtros de partículas o los catalizadores.

Algunos de las normas que en su momento marcaron un antes y un después en la fabricación de vehículos fueron las siguientes:

- La EURO 1 introdujo la obligatoriedad de instalación de catalizadores en 1992
- La EURO 5 obligó a los vehículos diésel a incluir filtros de partículas
- La EURO 6 obliga a los vehículos diésel a incluir catalizadores SRC con AdBlue.

Actualmente la norma EURO vigente es la 6C que se corresponde con la tercera fase de la norma EURO 6. Esta última actualización de la normativa impone reducciones muy considerables de los gases más perjudiciales emitidos por los vehículos: El CO₂, los NO_x y las partículas PM.

3.5.2 Evolución de la norma EURO

Como se ha comentado anteriormente esta normativa surge en 1988 cuando en Europa se percibe un aumento significativo de las emisiones contaminantes y empieza a surgir una conciencia medioambiental que es consciente de que no se puede seguir contaminando al mismo nivel.

Sin embargo, la primera normativa (EURO 0) no incorpora demasiadas restricciones, y no será hasta 1992 cuando la normativa EURO 1 marque un punto de inflexión al exigir a los fabricantes de vehículos diésel y gasolina que incorporen en sus motores un catalizador que reduzca y transforme los gases que resultan del proceso de combustión.

Otro hecho importante que se produjo en esos años fue la eliminación del plomo de la gasolina lo que la hacía muy volátil y, además de producir daños en el motor, emitía partículas de plomo altamente tóxicas a la atmósfera.

Desde 1992 hasta 2005 se crean hasta 3 normas EURO nuevas (2,3 y 4) que entre otras cosas introducen obligaciones como la de reducir el tamaño del motor o incorporar más marchas a la caja de cambios para tratar de reducir el consumo de combustible, bajar el régimen de giro del motor y de esta manera producir menos CO.

Sin embargo, a pesar de todas estas normas, las emisiones siguen siendo elevadas y efectos derivados de ellas como el calentamiento global se hacen cada vez más evidentes. Es por ello, que en 2009 se crea la EURO 5 centró su aplicación sobre todo en los vehículos diésel. Este tipo de vehículos emiten mayor cantidad de partículas PM que los de gasolina y es ahí donde reside su principal problema. Estas partículas son difíciles de eliminar y afectan de una manera muy directa a las personas ya que tienen gran facilidad para penetrar en el organismo de las personas. La EURO 5 por tanto, obliga a incorporar en los vehículos filtros antipartículas que retienen y evitan la emisión de aquellas que sean de mayor tamaño.

3.5.3 EURO 6

La normativa EURO 6 entró en vigor en 2014 para vehículos nuevos y en 2015 obligó a que se cumpliera para todas las nuevas matriculaciones. Actualmente se encuentra en vigor la tercera revisión de esta norma (6C) pero en el presente 2020 se espera que entre en vigor la 6D

Una de las mayores novedades que introdujo esta norma es la obligación de que los vehículos diésel incorporen AdBlue. Este líquido a base de urea provoca la descomposición de los óxidos de nitrógeno (NO_x) en sustancias menos dañinas. La utilización de AdBlue es más eficaz que los catalizadores a la hora de eliminar los óxidos de nitrógeno (NO_x) llegando a eliminarlos hasta el 95%, frente al 85% que ofrecían los catalizadores.

La EURO 6 y todas sus posteriores revisiones se han centrado en la reducción de los gases contaminantes. Algunas de las obligaciones que esta norma impone a los fabricantes son:

- Incorporar filtros de partículas EGR
- Neumáticos de baja resistencia a la rodadura
- Sistema de arranque y parada Start & Stop.
- Catalizador SRC con depósito para AdBlue.

3.6 Normativa española sobre emisiones de vehículos

Según el Ministerio de Transición Ecológica, España cuenta actualmente con un parque de cerca de 22 millones de turismos y 2,5 millones de vehículos comerciales ligeros. Este parque automovilístico supone un 25% de las emisiones totales de gases de efecto invernadero y un 30% de las emisiones totales de NO_x .

Anteriormente se ha descrito la normativa española vigente en cuanto a calidad del aire. Sin embargo, en este apartado lo que se verá es la normativa relativa a emisiones de vehículos ligeros y pesados en España.

Se considera vehículo pesado a aquel que supere los 3500 KG de masa máxima equipados con motores y los ligeros aquellos cuya masa se encuentre por debajo de 3500 Kg. A continuación, se detallará la legislación vigente en España para ambos tipos de vehículos.

3.6.1 Legislación sobre vehículos ligeros

Actualmente existen dos grandes reglamentos en materia de emisiones relativos a vehículos ligeros: Emisiones de CO_2 y otro tipo de emisiones contaminantes:

- Dióxido de Carbono (CO_2): En 2009 se aprobó el Reglamento 443/2009/CE conocido como “ CO_2 -TURISMOS” que imponía restricciones a los fabricantes de vehículos para tratar de llegar a niveles cercanos a los 95 gCO_2/Km de los vehículos de nueva fabricación como media para 2020. En 2011 se aprobó el Reglamento 510/2011/CE para vehículos comerciales ligeros que pretende alcanzar valores próximos a los 147 gCO_2/Km en 2020 para vehículos con masas inferiores a 2610 Kg.
- Otros contaminantes: La regulación de contaminantes como CO, NO_x o partículas PM10 y PM2,5 se regula mediante la normativa EURO anteriormente descrita. Siendo la norma EURO 6 la actualmente vigente y que se normaliza en el Reglamento 715/2007/CE.

Atendiendo a estos Reglamentos actualmente los vehículos de nueva fabricación no podrán emitir más de 95 gCO_2/Km ateniéndose a multas de 95 euros por cada gramo a mayores que emitan dichos vehículos.

Las tablas que se muestran a continuación muestran los valores permitidos según la norma EURO 5 y EURO 6 para vehículos turismo (categoría M) y para vehículos comerciales ligeros (Categoría N):

La norma EURO 5 establecía los siguientes valores límite:

		EURO 5 (M1, N1 y N2 ligeros en mg/km, N2 y N3 en mg/Kwh)													
		CO		HTC		HCNM		NOx		HCT + NOx		PM		NP	
		PI	CI	PI	CI	PI	CI	PI	CI	PI	CI	PI	CI	PI	CI
Personas	M1	1000	500	100		68		60	180		230	5	5		6X10 ¹¹
Mercancías	N1														
	N1-I	1000	500	100		68		60	180		230	5	5		6X10 ¹¹
	N1-II	1810	630	130		90		75	235		295	5	5		6X10 ¹¹
	N1-III	2270	740	160		108		82	280		350	5	5		6X10 ¹¹
	N2	2270	740	160		108		82	280		350	5	5		6X10 ¹¹

Tabla 3.6-1 Valores límite de emisión para vehículos ligeros establecidos en la norma EURO 5. Fuente: Ministerio para la transición ecológica.

Actualmente la norma en vigor es la EURO 6 que se detalla a continuación:

		EURO 6 (M1, N1 y N2 ligeros en mg/km, N2 y N3 en mg/Kwh)													
		CO		HTC		HCNM		NOx		HCT + NOx		PM		NP	
		PI	CI	PI	CI	PI	CI	PI	CI	PI	CI	PI	CI	PI	CI
Personas	M1	1000	500	100		68		60	80		170	4,5	4,5	6X10 ¹¹	6X10 ¹¹
Mercancías	N1														
	N1-I	1000	500	100		68		60	80		17	4,5	4,5	6X10 ¹¹	6X10 ¹¹
	N1-II	1810	630	130		90		75	105		195	4,5	4,5	6X10 ¹¹	6X10 ¹¹
	N1-III	2270	740	160		108		82	125		215	4,5	4,5	6X10 ¹¹	6X10 ¹¹
	N2	2270	740	160		108		82	125		215	4,5	4,5	6X10 ¹¹	6X10 ¹¹

Tabla 3.6-2 Valores límite de emisión para vehículos ligeros establecidos por la norma EURO 6. Fuente: Ministerio para la transición ecológica.

Cabe destacar que la categoría N hace referencia a los vehículos de motor destinados al transporte de mercancías que tengan al menos cuatro ruedas. Dentro de la categoría N se puede diferenciar entre N1, N2 y N3:

- N1: Masa máxima no superior a 3,5 toneladas.
- N2: Masa máxima superior a 3,5 toneladas, pero inferior o igual a 12 toneladas.
- N3: Masa máxima superior a 12 toneladas.

3.6.2 Legislación sobre vehículos pesados

En este caso debido a la baja incidencia que este tipo de vehículos genera en las ciudades únicamente se va a detallar las emisiones límite permitidas según la norma EURO 6 que es la que se encuentra vigente para este tipo de vehículos:

		EURO 6 (M1, N1 y N2 ligeros en mg/km, N2 y N3 en mg/Kwh)															
		CO		HCT		HCNM		NOx		HCT + NOx		NH3		PM		NP	
		PI	CI	PI	CI	PI	CI	PI	CI	PI	CI	PI	CI	PI	CI	PI	CI
Personas	M2		1500		130				400				10		10		
	M3		1500		130				400				10		10		
Mercancías	N2		1500		130				400				10		10		
	N3		1500		130				400				10		10		

Tabla 3.6-3 Valores límite de emisión para vehículos pesados establecidos por la norma EURO 6. Fuente: Ministerio para la transición ecológica.

3.7 Clasificación vehicular en función de sus emisiones de CO₂

En España los vehículos se clasifican mediante unos distintivos (pegatinas) en función de sus emisiones de Dióxido de Carbono. A continuación se describe esta clasificación y se presentan sus diferentes categorías.

3.7.1 Introducción a los distintivos de la Dirección General de Tráfico (DGT)

Desde 2016 la Dirección General de Tráfico ha llevado a cabo una distinción del parque automovilístico español en cinco categorías en función del nivel de emisiones contaminantes producidas por cada vehículo.

Esta medida se llevó a cabo para impulsar la venta de vehículos ecológicos ya que los conductores de este tipo de vehículos pueden beneficiarse de ciertas ventajas como pueden ser evitar restricciones del tráfico impuestas por los ayuntamientos de las diferentes ciudades por motivos derivados de la contaminación.

Estos cinco niveles en los que se dividen este tipo de vehículos son: 0, ECO, B, C y “resto de vehículos”. Esta última clasificación hace referencia a los vehículos más contaminantes y que no tienen categoría dentro de los vehículos ecológicos. Los vehículos que sí que cuenten con categoría han de llevar un distintivo (pegatina) que sea visible en la luna delantera del coche y que puede ser recogida en cualquier oficina de Correos o de la DGT.

3.7.2 Etiquetas de la DGT

A continuación, se muestran los 4 distintivos y se detallan las características que tienen los vehículos de dicha categoría:

- **Vehículos de 0 emisiones (0):** Son los vehículos menos contaminantes de todos. Su distintivo es azul y cuentan con el mayor número de ventajas. Según los últimos datos aportados por la DGT (2018) en España hay 25.738 turismos con este distintivo. En esta categoría se incluyen los siguientes vehículos: Eléctrico de batería (BEV), eléctricos de autonomía extendida (REEV), vehículos híbridos enchufables (PHEV) y los vehículos de pila de combustible.



Ilustración 3.7-1 Etiqueta distintiva “0 emisiones”. Fuente: DGT

- Vehículos ECO:** Los vehículos ECO han de cumplir con las características de los vehículos con distintivo ambiental C. Su distintivo es verde y azul y la DGT (2018) establece que existen 275.569 turismos en España. Dentro de esta categoría se incluye a los siguientes vehículos: Vehículos híbridos enchufables con autonomía inferior a 40 km, híbridos no enchufables, vehículos propulsados con gas natural (GNC y GNL) y los vehículos que emplean gas licuado como combustible (GLP).



Ilustración 3.7-2 Etiqueta distintiva "ECO". Fuente: DGT

- Vehículos C:** El distintivo C es de color verde y contarán con él todos los vehículos diésel que cumplan con la normativa EURO 6 y los gasolina que cumplan con la EURO 4, 5 y 6. La DGT (2018) estima en 6.365.027 los turismos que se benefician de este distintivo. En general todos los turismos y furgonetas ligeras con motor diésel matriculados a partir de 2014 y los de gasolina matriculados desde 2006.

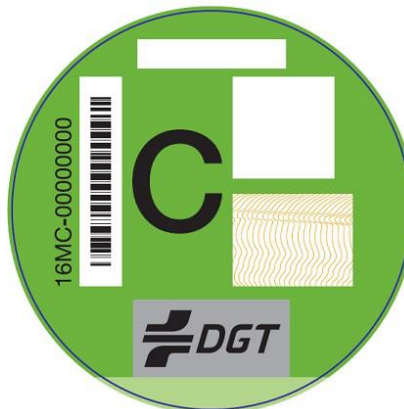


Ilustración 3.7-3 Etiqueta distintiva "C". Fuente: DGT

- Vehículos B:** Dentro de las cuatro categorías ecológicas, esta sería la que incluye a los vehículos con menor eficiencia energética. Su distintivo es amarillo y la DGT (2018) estima en 8.193.120 los turismos con este distintivo en España. Dentro de la categoría B se encuentran los turismos y furgonetas ligeras con motor diésel matriculados desde 2006 y los gasolina matriculados desde el año 2000. Los vehículos pesados de más de ocho plazas matriculados desde 2005 también se benefician de este distintivo.



Ilustración 3.7-4 Etiqueta distintiva "B". Fuente: DGT

Como se mencionaba anteriormente los vehículos que cuenta con alguna de estas distinciones pueden beneficiarse de algunas ventajas. Las ventajas son muy diversas y normalmente son los Ayuntamientos de las ciudades los que llevan a cabo esta discriminación positiva. Sin embargo, algunas de las ventajas más comunes son las siguientes:

- Los vehículos "0 Emisiones" podrán circular siempre por los carriles VAO.
- Aparcar gratis en la zona azul de las ciudades.
- Circular por zonas de tráfico restringido.
- Diversas ventajas fiscales.

3.7.3 El vehículo eléctrico como alternativa

En el apartado anterior se ve como los vehículos eléctricos o híbridos se presentan como los más eficientes y "ecofriendly" actualmente existen corrientes de pensamiento que consideran que, aunque sí que es cierto que no emiten gases contaminantes, pueden llegar a producir efectos igualmente nocivos sobre el medio ambiente ya que la industria que produce sus baterías si produce emisiones contaminantes.

Según la Unión Europea actualmente el vehículo eléctrico supone el 1,5% del mercado de automóviles. sin embargo, el número de matriculaciones de vehículos eléctricos aumenta cada año. Por ejemplo, si comparamos los vehículos eléctricos que se vendieron en 2017 con respecto a los de 2016 el aumento fue de un 51% en Europa.

Si atendemos a los datos de España, el Diario El Mundo publicó el 2 de enero de 2019 que en el año 2018 el número de matriculaciones había crecido un 60% con respecto a 2017, pasando de 13.000 matriculaciones en ese año a 21.181 en el 2018.

Por lo tanto, si la tendencia sigue como hasta ahora, cabe pensar que el vehículo eléctrico irá adquiriendo un papel cada vez más importante en el tráfico rodado.

Si bien es cierto que el vehículo eléctrico es una alternativa totalmente limpia ya que no produce emisiones de gases contaminantes, no solo hay que tener en cuenta las emisiones a la hora de pensar cuanto contamina un determinado vehículo. Procesos como la producción o la eliminación de los elementos que incluye un vehículo también han de ser tenidos en cuenta.

En este sentido el coche eléctrico no supone una alternativa demasiado respetuosa con el medio ambiente. Sin embargo, a medida que la producción de energía necesaria para la elaboración y funcionamiento de los vehículos eléctricos se haga más renovable este tipo de vehículos si que supondrán una alternativa totalmente limpia, o al menos mucho más que los vehículos de combustión interna.

A continuación, se muestra en una gráfica elaborada por la Agencia Europea de Medio Ambiente una comparativa que muestra el ciclo de vida de las emisiones de CO₂ para vehículos eléctricos y gasolina:

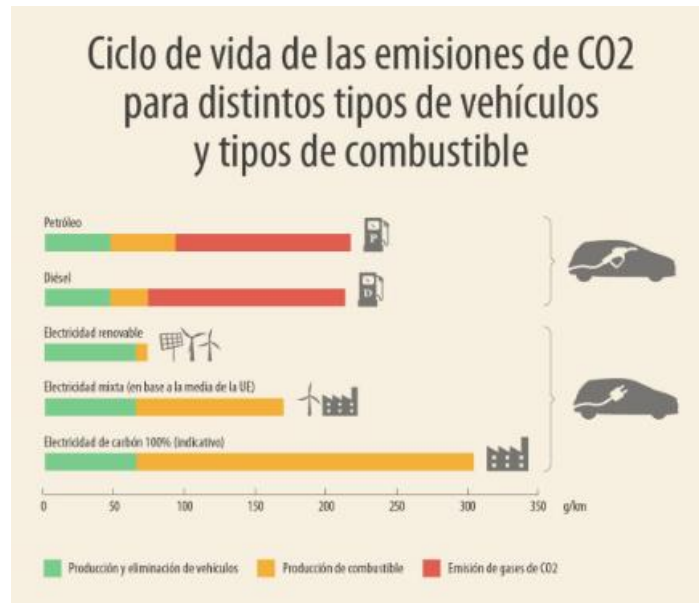


Ilustración 3.7-5 Ciclo de vida de las emisiones de CO₂ para distintos tipos de vehículos y combustibles. Fuente: Agencia europea de medio ambiente

Observamos como en el caso de los vehículos eléctricos la producción y eliminación de los mismos es más contaminante que la producción y eliminación de vehículos diésel y gasolina. Por otro lado, se observa como a pesar de que los vehículos eléctricos no emiten CO₂ durante su funcionamiento la producción de la electricidad que necesitan para funcionar si lo hace y en cantidades incluso mayores que las de los vehículos de combustión.

Por lo tanto, excepto que la energía eléctrica se genere a partir de fuentes renovables, si atendemos a todo el ciclo de vida de un vehículo, el eléctrico no supone una alternativa demasiado ecológica.

Sin embargo, en los núcleos urbanos de las ciudades donde los problemas de contaminación derivan directamente de las emisiones producidas por los vehículos, el eléctrico si que resulta verdaderamente interesante ya que reduce esas emisiones a 0.

3.8 Medidas tomadas por otras ciudades

Debido a los efectos tan nocivos que tienen sobre el medio ambiente, la salud de las personas y la calidad del aire, las emisiones de gases contaminantes producidas por los vehículos, aquellas ciudades con mayor número de vehículos se han visto obligadas en los últimos años a adoptar medidas que restringen el tráfico de alguna manera en los núcleos urbanos de las ciudades con el objetivo de que disminuyan las emisiones de los vehículos.

Sin embargo, no existe un criterio común, y cada ciudad ha tomado medidas diferentes con diferentes grados tanto de aceptación por parte de los ciudadanos como de eficiencia en cuanto al objetivo principal de dichas medidas: Mejorar la calidad del aire que se respira.

A continuación, se van a describir las medidas tomadas por algunas ciudades alrededor del mundo, así como aquellas que ha tomado el Ayuntamiento de Valladolid en algunas ocasiones en las que los centros de medición daban valores elevados de contaminantes en el aire.

- **MADRID**

Madrid, al ser la capital de España, tiene un parque automovilístico enorme y la densidad y flujo de tráfico también son enormes. Todos estos vehículos circulando constantemente por sus calles fue creando poco a poco una capa de contaminación sobre el cielo de la ciudad, visible desde la lejanía.

Esto hizo que el Ayuntamiento tuviese que plantearse llevar a cabo alguna medida para tratar de reducir las emisiones y de destruir esa capa de polución. Es por ello que el 30 de noviembre de 2018 se pone en marcha “Madrid Central”.

Madrid Central es una zona que abarca gran parte del centro de Madrid (472 hectáreas) de bajas emisiones que trata de favorecer el tránsito de peatones, bicicletas y transporte público.

En el interior de esta área no existen calles de libre circulación, por lo que se elimina gran parte del tráfico rodado en su interior y por lo tanto se reducen drásticamente las emisiones en esta zona.

Esta medida ha generado importantes beneficios medioambientales en la ciudad, ya que ha conseguido reducir en un 40% las emisiones de dióxido de nitrógeno (NO₂) en el centro de la ciudad. Además de reducir las emisiones se ha conseguido también reducir otros aspectos nocivos como pueden ser el ruido.

Cabe destacar que Madrid Central si que permite la entrada de ciertos vehículos tales como los de los residentes, los servicios de reparto, los servicios de seguridad y emergencias y vehículos para personas de movilidad reducida. Además los vehículos que cuenten con algún tipo de distintivo de los anteriormente descritos gozarán de ciertas ventajas en Madrid Central:

- **Distintivo 0 Emisiones:** Circulación y estacionamiento libre sin restricción horaria.
- **Distintivo ECO:** Circulación y estacionamiento libre con una restricción horaria de 2 horas máximo.
- **Distintivos C y B:** Solo tendrán la posibilidad de acceder al centro de la ciudad si es para estacionar en un garaje público o privado.

Los accesos al área de Madrid Central están señalizados tanto horizontal como verticalmente para evitar que personas que no lo deseen entren sin darse cuenta ya que si se circula por Madrid Central incumpliendo la normativa se recibirá una sanción económica.

En el siguiente mapa se puede ver el área que abarca Madrid Central:

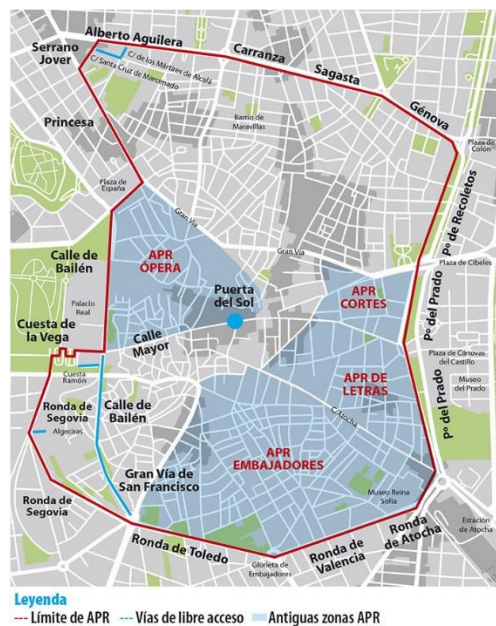


Ilustración 3.8-1 Área geográfica de Madrid Central. Fuente: Ayuntamiento de Madrid

• BARCELONA

La ciudad de Barcelona ha llevado a cabo desde el 1 de enero de 2020 una medida muy similar a la de Madrid al generar un área de la ciudad de Barcelona (ZBE Rondas de Barcelona) que impone restricciones al tráfico de manera fija de lunes a viernes.

El Ayuntamiento de Barcelona pretende conseguir una reducción del 30% de las emisiones contaminantes en la atmósfera en 15 años gracias a esta medida.

La ZBE Rondas de Barcelona abarca un área de 95 km² abarcando toda la ciudad de Barcelona comprendida entre dos rondas importantes (Dalt y Litoral). Por lo tanto, esta zona también afecta a municipios cercanos a la ciudad como L'Hospitalet de Llobregat, Cornellà de Llobregat, Espluges de Llobregat y Sant Adrià de Besòs.

Las restricciones de la ZBE Rondas de Barcelona afecta a todos aquellos vehículos que no cuenten con distintivo ambiental de la DGT, por lo tanto, aquellos que si cuentan con dicho distintivo, residentes, emergencias y VPMR no tendrán restricciones de tránsito.



Ilustración 3.8-2 Área geográfica de ZBE Rondas de Barcelona. Fuente: Generalidad de Cataluña

- **NUEVA YORK**

La ciudad de Nueva York no tiene actualmente ninguna medida que restrinja el tráfico por sus calles. Sin embargo, a partir de 2021 cobrará lo que se conoce como “tasa de congestión” que lejos de tener un objetivo medioambiental lo que pretende es recaudar grandes cantidades de dinero con el objetivo de modernizar las redes de metro y de cercanías.

Esta medida ha sido promovida por el Gobernador Andrew Coumo que pretende recaudar 1.000 millones de dólares al año para financiar las obras de remodelización del metro y mejorar los servicios de transporte público. Sin embargo, aunque el principal objetivo sea financiero, la imposición de esta tasa también implicará la reducción del tráfico por Manhattan por lo tanto se producirá una reducción de las emisiones contaminantes.

La zona comprenderá el área desde la calle 60 hasta el distrito financiero. Esta zona habitualmente está siempre muy congestionada y en muchas ocasiones es más rápido ir andando que en coche por lo tanto con esta medida también se pretende descongestionar esta zona para que el tráfico de vehículos que realmente necesitan circular sea más fluido.

- **LONDRES**

Lo que en Nueva York entrará en vigor en 2021 lleva aplicándose en Londres desde hace 15 años. El por entonces alcalde de la ciudad, Ken Livingstone, tras pasar por los tribunales consiguió aplicar esta tasa de congestión en el centro de la ciudad.

El área donde se aplica esta tarifa de congestión abarca 21 Km² y se aplica los días laborales de 6.00 AM a 6.00 PM. La tarifa por circular por esta zona dentro del horario establecido es fija e igual a 12 euros (11.50 libras).

Los usuarios que tengan la necesidad de transitar por esta zona durante la aplicación de la tasa podrán abonarla antes de la medianoche del día que vas a transitarla, ya que si lo haces después la tasa asciende hasta 15 euros (14 libras).

El acceso a esta zona está señalizado de manera muy similar a Madrid Central y también existen cámaras que graban a los vehículos que entran y multan a aquellos que no hayan abonado la tasa.

Existen algunas excepciones en cuanto al pago de la tasa como son:

- Las motocicletas y bicicletas están exentas de su pago
- Los residentes tienen un descuento del 90%
- Los conductores titulares de placa azul (movilidad reducida) quedan exentos.
- Aquellos vehículos que cumplan con la normativa EURO 5.

A continuación, se puede ver la zona que abarca la tasa de congestión de Londres:



Ilustración 3.8-3 Área geográfica de la tasa de congestión de Londres. Fuente: Trucoslondres.com

• **BERLÍN**

En Berlín existen pocas medidas que restrinjan el tráfico de manera drástica. El Ayuntamiento de la ciudad si pretende combatir la polución, pero, en este caso, lo hace a través de la limitación de la velocidad a 30 Km/h en las vías arteriales y calles más transitadas de la ciudad. Con esta medida pretende reducir la polución del aire sin que los ciudadanos vean restringida la posibilidad de circular por la ciudad.

Sin embargo, esta no es la única que medida que la ciudad ha impuesto ya que desde 2008 existen un área medioambiental de 88 Km² donde solo podrán circular vehículos con distintivo de color verde. El distintivo verde lo poseen en Alemania todos aquellos vehículos que cumplan con la norma EURO 4 o superiores.

En 2019 si que se impulsó una medida mucho más drástica que llevo a cabo la generación del distintivo azul para vehículos que cumplan con la norma EURO 6. Estos vehículos serán los únicos que podrán circular por ciertas calles que aún no abarcan una zona muy significativa de Berlín.

- **OSLO**

Oslo se ha propuesto eliminar al 100% la emisión de gases contaminantes antes de 2025. Para conseguir este complicado reto Noruega prohibirá la total circulación de coches que se propulsen con diésel o gasolina a partir de 2025. Cabe destacar que actualmente en Noruega el 67% de los vehículos son eléctricos enchufables, además los coches Tesla (100%) eléctricos cuentan con una gran aceptación en este país.

La ciudad comenzó por renovar todo su sistema de transporte público haciendo que en el presente 2020 todos estos medios de transporte se muevan con energía renovable. El objetivo es cumplir con los acuerdos firmados en la Cumbre por el Clima de París de 2015.

A principio de 2018 la región de Akershus puso en marcha el plan Ruter Fossil Free 2020 por el cual pretendían reducir el 77% de autobuses que en ese año se movían con diésel a un porcentaje próximo a 0. Durante el periodo que abarcó desde 2018 hasta el año actual más de 1100 autobuses de la región se convirtieron en eléctricos.

Además, para promover el vehículo eléctrico el Gobierno de Noruega permite ahorrar un 25% en el IVA y la omisión del pago total del impuesto de matriculación a todas aquellas personas que adquieran un vehículo eléctrico.

Sin embargo, todas estas medidas chocan con el sector que constituye el 40% del PIB del país que es la industria petrolera ya que Noruega encontró este preciado elemento bajo sus aguas en los años 60.

- **VITORIA-GASTEIZ**

Vitoria-Gasteiz es probablemente la ciudad europea que mejores resultados ha conseguido mediante la implantación de reducciones de tráfico. Esto le llevó a conseguir en 2012 el premio de European Green Capital 2012 por la implantación de las conocidas como Supermanzanas. Con la implantación de estas Supermanzanas centra, Vitoria logró reducir el porcentaje de viajes que se realizaban en coche privado desde un 37% en 2008 hasta un 18% en 2019. Además, la ciudad ha conseguido reducir en un 42% las emisiones de NO₂ y en un 38% las de partículas PM.

Las supermanzanas consisten en células urbanas de entre 16 y 30 hectáreas y cuyo interior queda liberado del tránsito de coches. Las células engloban una serie de calles y edificios que quedan delimitadas por una periferia que será por donde circule el transporte normalmente. Dentro de la supermanzana existe un sistema de bucles que permite el acceso en coche a todas las fachadas, sin embargo, este sistema hace que los coches que entren sean expulsados a la isma vía por la que entraron. En la siguiente imagen se esquematiza una supermanzana de Vitoria:

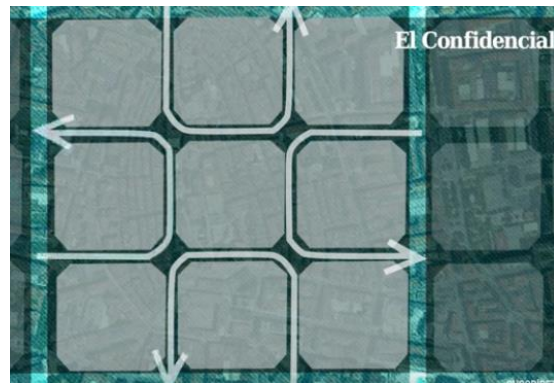


Ilustración 3.8-4 Supermanzanas de Vitoria-Gasteiz. Fuente: El Confidencial

Además, la circulación por el interior de las células se reduce a 10 Km/h. De este modo se consigue generar arterias principales que permiten conectar unas supermanzanas con otras y se reduce el tráfico y por lo tanto la contaminación en el interior de ellas.

La reducción de la velocidad de los vehículos en el interior de las supermanzanas no solo pretende reducir la contaminación sino también hacer que puedan convivir los diferentes usos de las calles con total seguridad.

Con esta medida en Vitoria se ha conseguido liberar el 75% del espacio con una reducción del 12% de vehículos circulando. Y es precisamente esto lo que hace que esta idea sea muy exitosa.

Cabe destacar que otras ciudades como Barcelona están intentando implantar medidas similares.

- **VALLADOLID**

Aunque en Valladolid no existen limitaciones de tráfico permanentes sí que se llevan a cabo medidas por parte del Ayuntamiento de restricción del tráfico en ocasiones en las que los medidores de la ciudad ofrecen resultados preocupantes de contaminación.

Por ejemplo, el 24 de Julio de 2019 las estaciones de medida registraron valores de 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de ozono como valor máximo de las medias móviles octohorarias por undécimo día del mes. Debido a esta situación el Ayuntamiento de Valladolid llevó a cabo medidas en los días sucesivos para tratar de reducir estos valores:

- Día 24 de Julio de 2019: Restricción a 30 km/h en todo el casco histórico
- Día 25 de Julio de 2019: desde las 09.00 hasta las 21.00 restricción de todo el tráfico en el centro de la ciudad. Esta restricción se mantuvo hasta que los indicadores bajasen de 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Durante el tiempo que duró esta restricción la policía municipal estableció controles en las zonas de acceso al centro que actuaron como filtro para impedir que los vehículos que no contaban con las características exigidas para la circulación no penetrasen en el centro de Valladolid.

El Ayuntamiento promovió la utilización de los llamados “Aparcamientos Disuasorios” con los que cuenta la ciudad y durante el tiempo que duró la restricción fueron gratuitos.

A continuación, se muestra una tabla resumen de los valores de ozono que se registraron en las distintas estaciones con las que cuenta la ciudad. Las medidas que se tomaron y que se toman en Valladolid ante situaciones similares no son improvisadas ya que están recogidas en un Plan de Acción en Situaciones de Alerta por Contaminación del Aire Urbano.

Por lo tanto, siempre se llevará a cabo en un primer lugar la limitación a 30 Km/h de todo el tráfico y la restricción de tránsito por el centro de la ciudad para todos aquellos vehículos que no sean de residentes, VPPMR, transporte público o vehículos que cuenten con el distintivo 0 o ECO de la DGT.

ESTACIÓN	MÁXIMO MEDIO OCTOHORARIO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)							
	JULIO							
	18	19	20	21	22	23	24	25
Vega Sicilia	96	93	109	105	112	127	129	118
Poniente	100	105	104	101	108	120	122	113
Valladolid Sur	112	114	110	110	122	128	129	121
Michelín 1	101	125	109	104	115	129	123	111
Michelín 2	98	117	100	101	108	119	125	116

Tabla 3.8-1 Datos recogidos por las estaciones de Valladolid en Julio de 2019. Fuente: Ayuntamiento de Valladolid

Actualmente la ciudad de Valladolid está experimentando profundos cambios en la ordenación de su tráfico. Desde el Ayuntamiento se está llevando a cabo una reordenación de las calles del centro de la ciudad limitando cada vez más las calles transitables por vehículos privados y dando espacios exclusivos a bicicletas, autobuses y taxis.

Un ejemplo de lo descrito anteriormente es la creación de la plataforma VA-10 que lo que ha hecho es crear carriles exclusivos para bus y taxi en el centro de la ciudad para favorecer el uso del transporte público. A continuación, se muestra una imagen con el recorrido completo que puede desarrollar el bus por carriles exclusivos gracias a VA-10

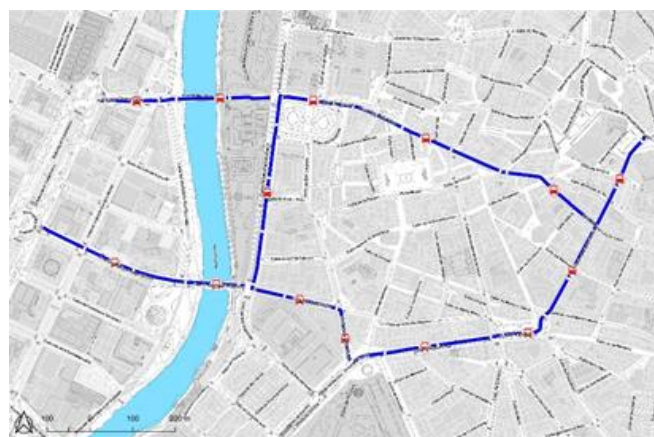


Ilustración 3.8-5 Recorrido VA-10 de carriles exclusivos para buses y taxis. Fuente: Ayuntamiento de Valladolid





CAPÍTULO 4

SIMULACIÓN Y ANALISIS DE LOS MODELOS

4.1 Caracterización del área de estudio

Antes de pasar a ejecutar las simulaciones y con el objetivo principal de una mejor comprensión de los resultados obtenidos es necesario llevar a cabo una descripción minuciosa del área de estudio (La Rondilla).

4.1.1 Caracterización geográfica

El área de aplicación del presente trabajo, donde se van a llevar a cabo las simulaciones y estudios del tráfico rodado, es el barrio de La Rondilla en la ciudad de Valladolid. El barrio de La Rondilla se encuentra en la zona norte de la ciudad y se encuentra delimitado por el Río Esgueva en el norte, el Río Pisuerga en el Oeste, la avenida de Rondilla de Santa Teresa en el sur y la avenida de Palencia y la calle Santa Clara por el este. A continuación, podemos observar una imagen donde se puede apreciar la situación de La Rondilla dentro de Valladolid:



Ilustración 4.1-1 Mapa de barrios de Valladolid. Fuente: Google Maps

Este barrio cuenta con una superficie total de 82 hectáreas aproximadamente, suponiendo un 0,42% de la superficie total de Valladolid. Cuenta con 12.000 viviendas aproximadamente que albergan una población de 21.162 habitantes (Según datos actualizados por el Ayuntamiento de Valladolid el 1 de enero de 2020). Esto supone que La Rondilla es uno de los barrios con mayor densidad de Población de Valladolid.

El barrio de La Rondilla se desarrolla entre 1956 y 1972 a consecuencia del salto industrial y demográfico que la ciudad experimenta durante ese periodo. Otro aspecto destacable que provoca la necesidad de construir barrios como La Rondilla en Valladolid

es la afluencia masiva de inmigrantes del medio rural que se produce en el mismo periodo.

Ante la llegada masiva de población se produce una escasez de viviendas por lo que se construyó un gran número de ellas en poco tiempo, lo que provocó una infraestructura un tanto caótica llamada por los vecinos del barrio “Barrio Colmena”.

Debido a este sistema de urbanización caótico, la situación se agrava si se tiene en cuenta la adquisición masiva de vehículos por parte de los vecinos de La Rondilla convirtiéndose en un verdadero problema la circulación y estacionamiento de los mismos, ya que hay que tener en cuenta que muchas de las viviendas del barrio no cuentan con garaje.

Tal cantidad de vehículos circulando por sus calles, ya sea para desplazarse por la ciudad o en busca de un lugar para estacionar el vehículo, hace que los niveles de contaminación en La Rondilla sean bastante elevados. Este hecho hace que el estudio de la contaminación en esta zona y la simulación de modelos que busquen mejorar la calidad del aire se convierta en un trabajo de enorme interés para un Ingeniero.

En la imagen que se muestra a continuación, se puede ver el área donde se va a llevar a cabo el estudio y simulación del tráfico.



Ilustración 4.1-2 Vista aérea de La Rondilla. Fuente: Google Earth

Los accesos y salidas que la simulación tendrán también en cuenta puesto que constituirán gran cantidad de nodos de origen y destino se detallan a continuación:

Sur:

- Paseo del Renacimiento
- Mirabel
- Cardenal Torquemada
- Torrecilla

Oeste:

- Puente Condesa Eylo
- Rábida

Este:

- Gondomar
- Real de Burgos
- Penitencia
- Madre de Dios

Norte

- Avenida de Palencia
- Cardenal Torquemada

A continuación, se ofrecen algunos datos relevantes sobre la ciudad de Valladolid y sobre el barrio de La Rondilla:

- La provincia de Valladolid cuenta con 350.505 vehículos, de los cuales 265.268 son turismos. Dentro de los turismos 107.365 (40,47%) son gasolina, 157.386 (59.33%) son diésel y 517 (0.2%) utilizan otro tipo de carburante.
- La ciudad de Valladolid cuenta con 174.467 vehículos de los cuales 137.134 son turismos.
- La Rondilla cuenta con 7.846 turismos lo que se traduce en un nivel de motorización de 353 vehículos por cada mil habitantes

Los datos que se han expuesto anteriormente son los que ofrece la DGT en su última actualización 2018. Los datos que son propios de La Rondilla han sido aportados por la Concejalía de Movilidad del Ayuntamiento de Valladolid.

El objetivo de trabajar con datos actualizados y provenientes de fuentes fiables es conseguir que la simulación que se va a realizar a continuación sea lo más realista posible.

El estudio que se va a realizar en el presente trabajo se basará en tres simulaciones diferentes que posteriormente se podrán comparar:

1. Situación actual en La Rondilla sin ninguna restricción de tráfico
2. Limitación a 30 km/h para todos los vehículos que circulen por el barrio
3. Posibilidad de circulación de vehículos por matrículas pares/impares.

De este modo se podrá llevar a cabo un estudio tanto de las condiciones del tráfico como de las emisiones contaminantes en tres situaciones diferentes que se corresponden con días sin restricciones, días con restricciones leves y días con condiciones de tráfico muy restrictivas.

El objetivo final será determinar si las medidas que se llevan a cabo en días donde la contaminación es muy elevada, son realmente eficientes y consiguen que se reduzca de una manera significativa la cantidad de emisiones perjudiciales emitidas y como varían las condiciones de tráfico para cada una de las tres situaciones. Por lo tanto, una comparación final de los datos obtenidos en cada una de las simulaciones será fundamental para la obtención de conclusiones.

4.1.2 Caracterización del tráfico

Los tres modelos que se van a estudiar en este trabajo se harán en un intervalo de tiempo que comprenderá desde las 13.30 hasta las 15.30. El principal motivo por el cual las simulaciones se realizarán en dicha franja horaria es que para un total de 655.316 viajes que se realizan de media en un día, entre las 14-15 se realizan 60.502 lo que supone un 9,2% del total. Por lo tanto, resulta interesante llevar a cabo las simulaciones para el momento del día con mayor número de desplazamientos.

Estos datos han sido obtenidos del portal PIMUSSVA del Ayuntamiento de Valladolid, donde se aporta una gran cantidad de información acerca de la movilidad de la ciudad.

A continuación, se puede ver la distribución de viajes en franjas horarias de un día en Valladolid:

HORA	VIAJES	%
6:00-7:00	8.479	1,3
7:00-8:00	28.537	4,4
8:00-9:00	49.383	7,5
9:00-10:00	37.873	5,8
10:00-11:00	33.571	5,1
11:00-12:00	46.283	7,1
12:00-13:00	46.204	7,1
13:00-14:00	49.874	7,6
14:00-15:00	60.502	9,2
15:00-16:00	45.274	6,9
16:00-17:00	27.744	4,2
17:00-18:00	47.988	7,3
18:00-19:00	41.270	6,3
19:00-20:00	44.235	6,8
20:00-21:00	41.302	6,3
21:00-22:00	22.469	3,4
22:00-5:00	24.328	3,7
Total	655.316	100

Tabla 4.1-1 Distribución desplazamientos por franjas horarias. Fuente: PIMUSSVA

Por lo tanto, al simular el tráfico de 13.30 a 15.30 además de estudiar el rango de tiempo con mayor densidad también se incluye tiempos de 30 minutos de entrada en ese periodo y de salida del mismo.

En el siguiente gráfico se puede ver de manera más visual como entre las 14.00 y las 15.00 el número de desplazamientos es mucho mayor que en el resto del día. Esto es debido a que es la hora a la que la gente sale del trabajo y los niños y estudiantes de sus centros de estudio.

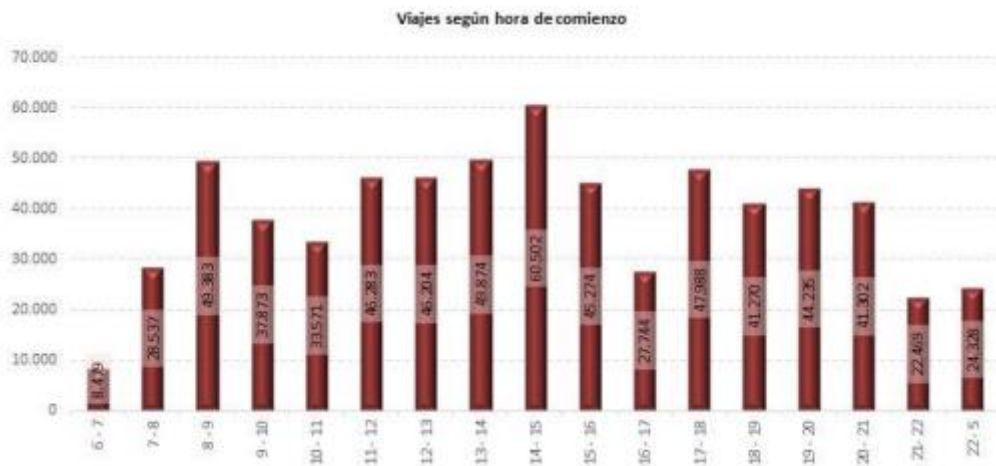


Gráfico 4.1-1 Viajes según hora de comienzo. Fuente: PIMUSSVA

Observando este gráfico se pueden observar dos horas punta (8.00-9.00 y 14.00-15.00) y dos horas valle (10.00-11.00 y 16.00-17.00).

En el estudio del tráfico de La Rondilla adquiere una importante relevancia aquellos vehículos que circulan por sus calles en busca de un lugar de aparcamiento ya que influyen en las condiciones de circulación debido a su baja velocidad y emiten gases contaminantes. Los datos de PIMUSSVA que se muestran a continuación son para la ciudad de Valladolid, pero pueden ser trasladados a La Rondilla.

Aparcamiento en destino	Nº de viajes	%
Libre	68.201	46
Zona ORA	3.305	2,2
Aparcamiento privado propio	48.703	32,8
Aparcamiento privado alquiler	5.339	3,6
Aparcamiento público	1.310	0,9
Otros	21.443	14,5
NS/NC	9.154	
Total	157.455	100

Tabla 4.1-2 Lugar de aparcamiento tras un desplazamiento. Fuente: PIMUSSVA

Vemos que aquellos vehículos que buscan una plaza de aparcamiento libre en la calle suponen casi la mitad del total (46%) esto se agrava en el barrio de estudio ya que el número de garajes privados es reducido por lo tanto el volumen de tráfico en este barrio de vehículos que buscan un aparcamiento es elevado.

4.2 Descripción del modelo Panis et al (2006)

Para entender cómo el software Aimsun Next opera internamente para el cálculo y la obtención de los resultados tras la ejecución de la simulación, es necesario llevar a cabo una descripción del modelo matemático que Aimsun implementa para el cálculo de dichos resultados.

4.2.1 Introducción al modelo

Aimsun Next permite, a través de su software, llevar a cabo un cálculo de la cantidad de gases que los vehículos que circulan por la red emiten durante el periodo de tiempo que dura la simulación. En concreto en la versión que se utiliza en el presente trabajo las emisiones se pueden calcular a través de dos modelos diferentes: Panis et al (2006) y QUARTET (1992).

Ambas son publicaciones científicas que proponen modelos que permiten el cálculo y la medición de las emisiones producidas por los vehículos durante una simulación de su movimiento por una red.

Como se comenta anteriormente una de las opciones que Aimsun ofrece para el cálculo de emisiones de gases contaminantes es la que se obtiene de la aplicación de un modelo elaborado por Luc Int Panis y Esteven Broekx del Instituto Flamenco de Investigación Tecnológica (Bélgica) y Liu Ronghui del Instituto de Estudios de Transporte de la Universidad de Leeds (Reino Unido).

El 3 de mayo de 2006 estos tres investigadores publicaron un estudio con el título *“Modelling instantaneous traffic emission and the influence of traffic speed limits”*. Donde proponen un modelo matemático que permite calcular la cantidad de gases contaminantes emitidos por una red de transporte durante un tiempo determinado.

El citado documento considera el efecto de control de la velocidad activa en las emisiones producidas por el tráfico. En concreto, las emisiones del tráfico producidas por la aceleración y desaceleración de los vehículos son modeladas sobre la base de un modelo de emisión instantánea integrada con un modelo de simulación de tráfico microscópico. Es decir, lo que el modelo estudiado hace es integrar un modelo de cálculo de emisiones basado en la velocidad y la aceleración de los vehículos con un modelo que simula el comportamiento del tráfico de manera microscópica. Este segundo modelo de simulación es el ofrecido por el propio programa Aimsun Next.

El modelo de cálculo de emisiones que se presenta en el documento se basa en mediciones empíricas que relacionan las emisiones de los vehículos con el tipo de vehículo, la velocidad instantánea y la aceleración. El modelo de simulación del tráfico se encargará de, segundo a segundo, captar la velocidad y aceleración de los vehículos individuales que circulan por la red y dichos datos serán utilizados por el modelo de emisiones para el cálculo de las mismas.

4.2.2 Antecedentes

Las emisiones producidas por los vehículos están directamente relacionadas con el tipo de conducción que se lleve a cabo por parte del conductor del vehículo. En una publicación anterior, De Vileger (1997) ya se demostró que las emisiones en condiciones reales de tráfico difieren considerablemente entre los diferentes conductores. En dicho estudio se demostró que la conducción agresiva dio lugar a un aumento considerable de consumo de combustible y de emisiones de gases en comparación con la conducción normal.

El consumo de combustible en una conducción agresiva es entre un 12 y un 40% mayor que en una conducción normal, las emisiones de monóxido de carbono (CO) aumentan entre un 1 y un 8% en conducción agresiva y las de los óxidos de nitrógeno aumentan entre un 20 y un 150%.

En los últimos años una amplia gama de medidas y políticas de transporte se han desarrollado e implementado para tratar de controlar y reducir la demanda de viajes (tarifación vial, peatonalización de calles o automatización de carreteras). Y aunque inicialmente estas medidas se crearon con el objetivo de reducir la congestión y mejorar la eficiencia de la red, también han tenido incidencia en la reducción de la contaminación del tráfico urbano. Sin embargo, no siempre ha sido posible medir directamente el efecto de las medidas que se han llevado a cabo sobre las emisiones de los vehículos y la contaminación del aire. Por ello, se ha realizado un considerable esfuerzo para desarrollar modelos que permitan describir las emisiones y la contaminación del aire resultantes de la aplicación de políticas de tráfico en la vida real.

Durante muchos años los modelos macroscópicos basados en la velocidad promedio de viaje han sido la metodología más utilizada para la estimación de emisiones de los vehículos. Sin embargo, estos modelos macroscópicos conllevan enormes simplificaciones sobre la exactitud de los procesos físicos que intervienen en las emisiones contaminantes. Un inconveniente importante de este tipo de metodología es que calcula las emisiones por kilómetro para las trayectorias de los vehículos usando principalmente la velocidad media. Esto se convierte en una desventaja ya que si bien es cierto que la velocidad total del viaje es un factor importante que influye en las emisiones, la fluctuación de velocidad instantánea juega un papel mucho mayor.

Para la elaboración de inventarios de emisiones de grandes áreas y durante periodos de tiempo largos, este efecto microscópico puede ser ignorado y los resultados de los modelos macroscópicos pueden aportar unas estimaciones razonablemente buenas. Sin embargo, para aplicaciones de menor escala y en tiempo real se tienen que desarrollar modelos que tengan en cuenta las condiciones de funcionamiento de los vehículos.

Con el objetivo de medir eficazmente los cambios de comportamiento del conductor en las emisiones de escape, es muy importante que los modelos incorporen las nuevas tecnologías empleadas por las políticas de tráfico, las respuestas de los conductores y las operaciones de los vehículos en tiempo real. Jourmard et al (1995) estableció una correlación entre las medidas de emisión con la velocidad y con el producto de la

velocidad por la aceleración, esto demostró que las tasas de emisión aumentaban no solo con el aumento de la velocidad sino también con el aumento de la aceleración.

En el estudio que se está describiendo: Panis et al (2006), se presenta una metodología para realizar el modelado de emisión instantánea compatible con los modelos de microsimulación de tráfico. En dicho estudio se muestra la funcionalidad básica del modelo de emisión y del modelo de microsimulación de tráfico.

El modelo de microsimulación de gráfico que se emplea en el estudio y que es muy similar al utilizado por Aimsun Next es el modelo DRACULA que se describirá posteriormente.

4.2.3 Metodología

Antes de describir la metodología del modelo se muestra en la figura siguiente como existe una relación estrecha entre las políticas de transporte que se llevan a cabo, la congestión del tráfico en las carreteras, las emisiones producidas por el tráfico y la contaminación del aire:

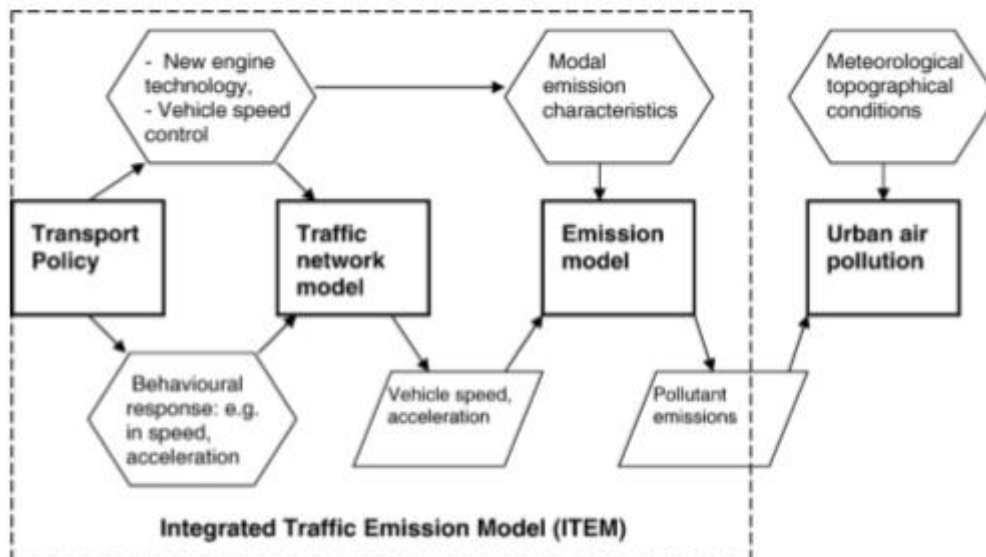


Ilustración 4.2-1 Metodología de Panis et al (2006). Fuente: Panis et al (2006)

La metodología que se va a describir lo que pretende es integrar los modelos de los diversos factores que se muestran en la figura anterior y describir un modelo que sirva como herramienta para, entre otras cosas, evaluar directamente los impactos de las políticas y medidas de transporte que se lleven a cabo sobre el medio ambiente.

Este modelo vincula las condiciones del tráfico simuladas por Aimsun Next en tiempo real con los modelos de emisiones que se basan en la velocidad instantánea y la aceleración y que por lo tanto permite elaborar estimaciones directas de las emisiones de escape.

Hay dos componentes principales en esta metodología y que ya se han introducido anteriormente: Un modelo de simulación de tráfico microscópico y un modelo de emisión microscópica. El primero es el proporcionado por Aimsun Next. Cabe destacar

que la metodología que se va a describir puede ser aplicable a cualquier software de simulación de tráfico que, al igual que Aimsun, proporcione medidas en tiempo real de las condiciones de tráfico en términos de velocidad y aceleración.

Lo que se hace en el estudio es describir la integración del modelo de emisiones nuevo que han creado con el tráfico microsimulado a través de DRACULA. La elección de este modelo de tráfico por parte de los investigadores es simplemente debido a que contaban con acceso al software y era capaz de incorporar el nuevo modelo de emisiones creado dentro de su marco de simulación, algo que Aimsun Next también es capaz de hacer y por eso lo aplica.

A continuación, se va a describir el modelo DRACULA de microsimulación de tráfico.

4.2.3.1 Modelo de microsimulación DRACULA

El modelo DRACULA (Dynamic Route Assignment Combining User Learning and microsimulAtion) al igual que el empleado por Aimsun se basa en una simulación explícita de los movimientos de los vehículos de manera individual por una red. Dentro de esa red interactúan con otros conductores y vehículos y con los diferentes controles de tráfico existentes (semáforos, límites de velocidad, señales...).

El modelo DRACULA es un paquete que incluye un modelo de microsimulación de tráfico para toda una red de transporte. Puede representar una amplia gama de tipos de vías, y controles de intersección. El modelo DRACULA representa los movimientos de los vehículos individuales a través de la red y lleva a cabo los registros de los datos ofrecidos por cada vehículo para finalmente mostrar los resultados de toda la red.

El modelo de tráfico se combina con una modelización que tiene en cuenta la evolución de las elecciones de ruta de los vehículos individuales en base a sus propias experiencias o a la programación que el usuario haga de esas rutas al manejar el software.

Como se puede observar Aimsun Next ofrece al usuario todas las funciones que caracterizan al modelo DRACULA y que por lo tanto lo hacen idóneo para la integración del modelo de emisiones que se ha desarrollado en el estudio Panis et al (2006).

- **Representación de la red**

Al igual que en Aimsun en el modelo descrito se parte de una red de carreteras representada por nodos y enlaces. Los diferentes tipos de intersecciones están representados incluyendo señalización vertical y glorieta. También se incluyen y se modelan la red de servicio de transporte público incluyendo los servicios regulares de autobús y sus paradas.

- **Representación del vehículo**

En el modelo DRACULA los vehículos están representados individualmente, teniendo cada uno un conjunto de características individuales que permite dar la descripción técnica del vehículo y representar el comportamiento del conductor

Estas características seleccionables incluyen:

- Tipo de vehículo
- Longitud del vehículo
- Aceleración máxima
- Máximos valores de desaceleración en casos de frenado de emergencia
- Tiempo de reacción del conductor
- Distancia de seguridad
- Aceleración normal en condiciones normales
- Factor de velocidad deseada y factor de riesgo

Cabe tener en cuenta que la velocidad deseada no solo está determinada por el deseo del conductor, sino que, como se ha visto en capítulos anteriores, está muy influenciada por las condiciones de tráfico existente o por los límites de velocidad establecidos.

Es por ello, que DRACULA emplea un “factor de velocidad deseada” que se modela en lugar de la velocidad propia deseada, para representar el diferente nivel de comportamiento en la elección de la velocidad de los conductores.

- **El movimiento del vehículo**

En el modelo de tráfico DRACULA, las velocidades y posiciones de los vehículos se actualizan en un incremento de tiempo fijo igual a 1 segundo.

Los vehículos se generan en sus nodos de origen y se mueven a través de la red en las rutas que han elegido, de acuerdo a un modelo llamado “coche-siguiente”, las reglas de cambio de carril, las normas de tráfico en las intersecciones o siguiendo las rutas que han sido programadas por parte del usuario del software que lo implementa.

El efecto directo de sobre las emisiones de vehículos viene de la velocidad del vehículo y la aceleración determinada en la simulación por el modelo de “coche de seguimiento” que se describe brevemente a continuación.

Los modelos “coche de seguimiento” representan las interacciones longitudinales entre los vehículos en un solo flujo de tráfico y modelan la respuesta de un vehículo-siguiente a un estímulo del vehículo o vehículos que se encuentren delante de él.

La forma más común de los modelos “coche de seguimiento” representa la respuesta del vehículo siguiente como un producto del estímulo y la sensibilidad del vehículo siguiente de la siguiente manera:

$$\textit{Respuesta} = \textit{Sensibilidad} \times \textit{Estímulo}$$

Ecuación 4.2-1 Respuesta del vehículo siguiente

Donde la respuesta se representa generalmente como la aceleración del vehículo de seguimiento y el estímulo se representa en términos de diferencia de espacio y velocidad. El modelo más sencillo de “coche de seguimiento” se desarrolló en 1950 en base a los datos recogidos por la General Motors en su pista de pruebas. La formulación que generaron es la siguiente:

$$a_n(t + \tau) = C_0[v_{n-1}(t) - v_n(t)]$$

Ecuación 4.2-2 aceleración del vehículo de seguimiento

Siendo:

$[v_{n-1}(t) - v_n(t)]$: Diferencia de velocidad entre el vehículo n y el $n-1$

$a_n(t + \tau)$: Aceleración del vehículo n tras un tiempo de reacción

En este modelo, una constante de sensibilidad C_0 fue integrada de la siguiente forma:

$$v_n(t + \tau) = \min \left\{ \begin{array}{l} v_n(t) + 2.5a_n^{max}\tau[1 - v_n(t)]/v_n^{des}[0.025 + v_n(t)/v_n^{des}]^{1/2} \\ c_1v_n(t) + c_2v_{n-1}(t) + c_3[s_n(t) - s_n^{min}] \\ d_n\tau + [d_n^2\tau^2 - d_n[2[s_n(t) - s_n^{min}] - v_n(t)\tau - v_{n-1}^2(t)/d]^{1/2} \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} 2a \\ 2b \\ 2c \end{array} \right.$$

Ecuación 4.2-3 Velocidad del vehículo n tras un tiempo de reacción τ

El modelo de “coche de seguimiento” implementado en DRACULA considera al vehículo siguiente en tres condiciones de tráfico diferentes:

- Flujo libre
- Seguimiento confortable
- Seguimiento cercano

Estas tres condiciones de tráfico se corresponden con las ecuaciones 2a, 2b y 2c cuya notación se describe al final de este apartado.

La ecuación (2a) representa la condición de “flujo libre” donde el vehículo n es el vehículo principal en una determinada sección de la red y su conductor utilizará su aceleración máxima (a_n^{max}) para alcanzar y mantener su velocidad deseada (v_n^{des}).

Cuando el vehículo ha alcanzado a la cola del pelotón precedente del tráfico, pero aún no se encuentra demasiado cerca del mismo, se considera que se encuentra en la situación de “seguimiento confortable” y su velocidad de seguimiento viene determinada en la ecuación (2b).

Cuando el vehículo se sitúa muy cerca del vehículo que le precede se encuentra en la situación de “seguimiento cercano”. Su conductor está preparado para aplicar el freno de emergencia con una deceleración máxima (d_n). La velocidad del vehículo de seguimiento viene determinada por la ecuación (2c).

Por lo tanto, la velocidad del vehículo de seguimiento n en el momento $t+\tau$ será el mínimo entre las tres velocidades de arriba (2a, 2b, 2c). La aceleración del vehículo n vendrá dada por la ecuación siguiente:

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

Ecuación 4.2-4 Aceleración del vehículo n tras un tiempo de reacción τ

4.2.3.2 Mediciones y modelado del nuevo modelo de emisiones

En el modelo creado por Panis et al (2006) permite el cálculo de los siguientes gases contaminantes: Óxidos de nitrógeno (NO_x), compuestos orgánicos volátiles (COV), dióxido de carbono (CO_2) y partículas (PM).

Como para otros contaminantes el impacto potencial para la salud es menor y se espera que su contribución a la carga total de exposición a los contaminantes va a ser mínima no se han modelado. Un ejemplo podría ser el monóxido de carbono que, aunque si es muy tóxico, su impacto es menor si se encuentra en pequeñas cantidades en aire abierto.

El dióxido de carbono (CO_2) ha sido modelado debido a su efecto sobre el cambio climático y a su relación directa con el consumo de combustible. Se sabe que 1kg de CO_2 corresponde, en promedio, a 0,4 litros de combustible, habiendo pequeñas diferencias entre los vehículos diésel y los de gasolina.

Para la elaboración del modelo se han generado nuevas funciones de emisión segundo a segundo para su uso en modelos de microsimulación de tráfico que se basan en mediciones reales con varios vehículos en situaciones de tráfico urbano real. Dichas mediciones fueron realizadas mediante el sistema VOEM.

La siguiente tabla muestra una visión general de todos los vehículos que fueron estudiados y analizados para obtener las citadas funciones de emisión:

VEHÍCULO	TIPO	COMBUSTIBLE	EURO	PRUEBAS ANALIZADAS
Toyota Yaris	Coche	Gasolina	3	2634
Volkswagen Polo	Coche	Gasolina	3	5461
Skoda Octavia	Coche	Diesel	3	4819
Alfa Romeo 156	Coche	Diesel	2	2365
Citröen Jumper	Coche	Diesel	3	10074
Ford Escort	Coche	Gasolina	1	11398
Toyota Corolla	Coche	Gasolina	1	2517
Ford Fiesta	Coche	Gasolina	1	13209
Opel Corsa	Coche	Gasolina	1	12782
Renault Clio	Coche	Gasolina	1	13194
Peugeot 205	Coche	Gasolina	0	14055
Toyota Celica	Coche	Gasolina	1	8704
Opel Astra	Coche	Gasolina	1	9318
Volkswagen Golf	Coche	Gasolina	1	10747
Volkswagen Golf	Coche	Diesel	1	5302
Rebault Megane	Coche	Gasolina	2	11642
Volvo 850	Coche	Diesel	1	6831
Van Hool A600	Bus	Diesel	2	1154
MAN A12	Bus	Diesel	2	7803
MAN A12	Bus	Diesel	2	5066
MAN NL202F	Bus	Diesel	1	9978
Van Hool A300D	Bus	Diesel	1	6654
Van Hool 3154	Bus	Diesel	2	5449
Iveco Eurocargo	Camión	Diesel	2	1638
Volvo FH12-420	Camión	Diesel	2	4514

Tabla 4.2-1 Vehículos utilizados para la elaboración del modelo. Fuente: Panis et al (2006)

Se puede observar que se hicieron 25 mediciones (17 turismos, 6 autobuses y 2 camiones). 13 de los vehículos estudiados son diésel y 12 son gasolina que cumpliesen con las normas EURO que en el momento (2006) estaban vigentes.

De estos datos se obtienen las funciones de emisión para cada vehículo con la velocidad instantánea y la aceleración como parámetros empleando múltiples técnicas de regresión no lineal. Finalmente se obtuvo una ecuación general válida para todas las emisiones contaminantes:

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

Ecuación 4.2-5 Cantidad de gas emitido por un vehículo

Siendo $v_n(t)$ y $a_n(t)$ la velocidad instantánea y la aceleración del vehículo n en el momento t calculadas a partir de las ecuaciones (4.2-3) y (4.2-4). E_0 es un límite inferior de emisión en (g/s) especificada para cada vehículo y tipo de contaminante y f_1 a f_6 son las constantes de emisión específicas para cada vehículo y el tipo de contaminante determinadas por el análisis de regresión.

Para ciertos contaminantes se obtienen diferentes funciones de emisión para rangos de aceleración diferentes. En la siguiente tabla se muestran los diferentes valores que adquiere las funciones de emisión para los distintos contaminantes y tipos de vehículos con aceleraciones diferentes:

FACTORES UTILIZADOS POR CONTAMINANTE Y TIPO DE VEHÍCULO								
CONTAMINANTE	TIPO DE VEHÍCULO	E_0	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6
CO ₂	GASOLINA	0	0,553	0,161	-0,00289	0,266	0,511	0,183
	DIESEL	0	0,324	0,0859	0,00496	-0,0586	0,448	0,23
	LPG	0	0,6	0,219	-0,00774	0,357	0,514	0,17
	HDV	0	1,52	1,88	-0,0695	4,71	5,88	2,09
	BUS	0	0,904	1,13	-0,0427	2,81	3,45	1,22
NO _x	GASOLINA($a \geq 0,5 \text{ m/s}^2$)	0	0,000619	0,00008	-0,00000403	-0,000413	0,00038	0,000177
	GASOLINA($a < 0,5 \text{ m/s}^2$)	0	0,000217	0	0	0	0	0
	DIESEL($a \geq 0,5 \text{ m/s}^2$)	0	0,00241	-0,000411	0,0000673	-0,00307	0,00214	0,0015
	DIESEL($a < 0,5 \text{ m/s}^2$)	0	0,00168	-0,0000662	0,000009	0,00025	0,000291	0,00012
	LPG($a \geq 0,5 \text{ m/s}^2$)	0	0,000892	0,0000161	-0,000000806	-0,0000823	0,000076	0,0000354
	LPG($a < 0,5 \text{ m/s}^2$)	0	0,000343	0	0	0	0	0
	HDV	0	0,0356	0,00971	-0,00024	0,0326	0,0133	0,0015
	BUS	0	0,0236	0,00651	-0,00017	0,0217	0,00894	0,00012
VOC	GASOLINA($a \geq 0,5 \text{ m/s}^2$)	0	0,000447	0,000000732	-2,87E-08	-0,00000341	0,00000494	0,0000354
	GASOLINA($a < 0,5 \text{ m/s}^2$)	0	0,00263	0	0	0	0	0
	DIESEL($a \geq 0,5 \text{ m/s}^2$)	0	0,0000922	0,00000909	-0,000000229	-0,000022	0,0000169	0,0115
	DIESEL($a < 0,5 \text{ m/s}^2$)	0	0,0000525	0,00000722	-0,000000187	0	-0,0000102	0,00757
	LPG($a \geq 0,5 \text{ m/s}^2$)	0	0,0144	0,000000174	-6,82E-09	-0,000000811	0,00000118	0,00000166
	LPG($a < 0,5 \text{ m/s}^2$)	0	0,00842	0	0	0	0	0
	HDV	0	0,00104	0,000487	0,0000149	0,00127	0,00021	0,00000375
	BUS	0	0,00155	0,00082	0,0000242	0,00186	0,000321	-0,00000422
PM	GASOLINA	0	0	0,0000157	0,000000921	0	0,0000375	0,000000396
	DIESEL	0	0	0,000313	0,00000184	0	0,00075	0
	LPG	0	0	0,0000157	0,000000921	0	0,0000375	0,0000189
	HDV	0	0,000214	0,000335	0,0000222	0,00207	0,0018	0,000227
	BUS	0	0,000223	0,000347	0,0000238	0,00208	0,00176	0,000223

Tabla 4.2-2 Valor de los factores en función del gas y del tipo de vehículo. Fuente: Panis et al (2006)

Para la obtención de los resultados mostrados en esta tabla, sobre la base de las acciones de los diferentes tipos de vehículos en relación con el tipo de combustible, la capacidad del motor y el tipo de norma EURO, se obtiene una función promedio para cada contaminante (incluyendo el límite inferior y las constantes) y para cada tipo de vehículo. Cada función se utiliza para predecir las emisiones de un coche y un viaje no incluidos en el conjunto de datos utilizados para el análisis de regresión utilizado para comprobar la exactitud del valor predicho.

Para la obtención de las funciones de emisión se han utilizado principalmente mediciones realizadas en el tráfico urbano (con velocidades bajas) para conseguir las formas funcionales y las variables de la ecuación (4.2-5). Con ello Panis et al (2006) considera que es suficiente para conseguir el propósito de evaluar las emisiones producidas por el tráfico en redes urbanas.

A continuación, se muestra una gráfica que representa las emisiones de CO₂ como función de la velocidad y la aceleración (superficie) comparadas con las mediciones (puntos) hechas directamente de un Skoda Octavia Euro 3 diésel.

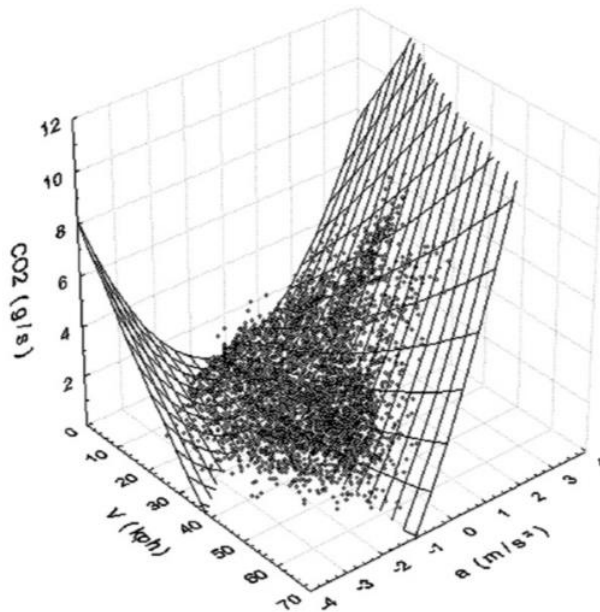


Gráfico 4.2-1 Comparativa realidad con modelo. Fuente: Panis et al (2006)

Se puede observar como las mediciones (puntos) se corresponden perfectamente con la superficie que representa el cálculo de las emisiones de CO₂ del vehículo en cuestión como función de la velocidad y la aceleración. Por lo tanto, se demuestra que la ecuación (4) reporta resultados fiables en cuanto a cálculo de emisiones de los gases contaminantes en redes urbanas.

Para validar los resultados de las funciones de emisiones instantáneas que se desarrollan en el documento de Panis, las emisiones totales para el periodo que incluye el pico de la mañana en un sitio de estudio urbano en la ciudad de Gante se compararon con modelos de emisión ya validados (COPERT, MEET y HBEFA). A continuación, se puede ver una comparativa entre los resultados obtenidos con el nuevo modelo de emisión desarrollado por Panis et al (2006) y el resto de modelos ya validados.

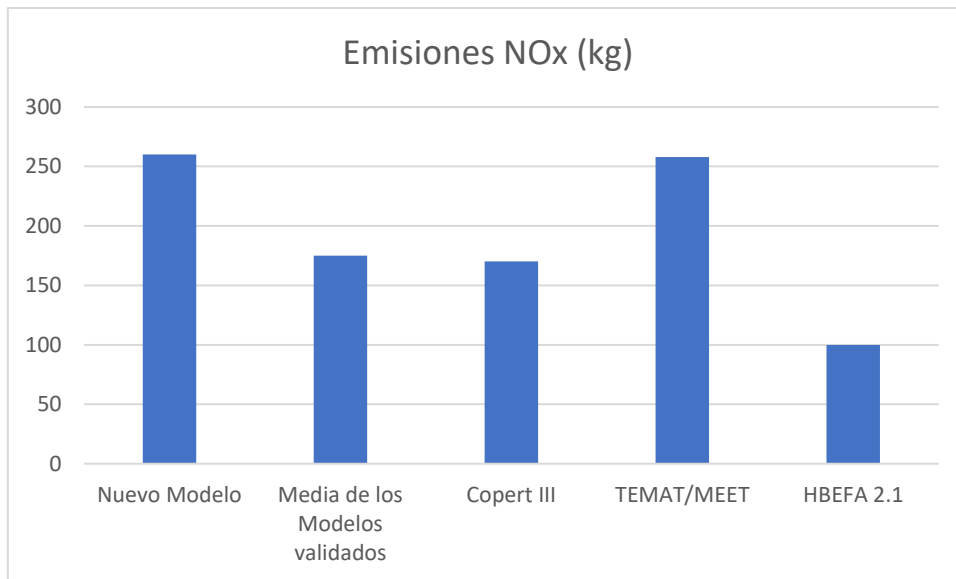


Gráfico 4.2-2 Comparativa resultados obtenidos con modelos ya validados. Fuente: Elaboración propia

Vemos como para la estimación de las emisiones de NO_x el modelo que más se aproxima es el MEET.

Una vez validadas las funciones que se han desarrollado se crea un nuevo módulo de emisión que integre las funciones de emisión de la ecuación (4) y los valores de los parámetros asociados a la misma que se exponen en una tabla anteriormente, con el modelo DRACULA. La estructura básica de este módulo de integración contempla cuatro modos de conducción diferentes:

- Aceleración
- Deceleración
- Crucero
- Ralentí

El modo de crucero se considera cuando la aceleración del vehículo se encuentra entre $-0,5 \text{ m/s}^2$ y $0,5 \text{ m/s}^2$.

Las emisiones en crucero se calculan como las emisiones a esa velocidad discreta específica con una aceleración igual a cero. Las emisiones al ralentí se calculan mediante el establecimiento de la velocidad y la aceleración iguales a cero en las funciones de emisión correspondientes.

4.2.3.3 Integración de los modelos de tráfico y emisiones

Para cada vehículo individual que se desplaza durante el periodo estipulado, DRACULA simula sus movimientos segundo a segundo a través de la red siguiendo sus rutas elegidas o programadas.

El funcionamiento del modelo una vez que se ha integrado el modelo de simulación microscópica de tráfico y el nuevo modelo de cálculo de emisiones, se puede dividir en 10 pasos que son los siguientes:

1. Inicialización: Consiste en configurar la red. Establecer el periodo de tiempo de estudio y establecer las medidas de política de tráfico.
2. Condiciones de suministro global: Para cada enlace en la red, establecer la velocidad de flujo libre con medios que representen las medias anuales y una varianza definida por el usuario para representar la variabilidad diaria debida a diferentes factores que influyen sobre el tráfico.
3. Condiciones de suministro local: Para cualquier incidente que se produzca en el día, asignar el incidente en el enlace o carril donde se ha producido y dar su hora de inicio y final.
4. Inicio de la simulación: Ajustar el reloj de simulación con $t=0$.
5. Generación del vehículo: Cada vehículo que va a viajar en el día entra en la red a través de su nodo de origen.
6. Movimiento del vehículo: Cada vehículo se mueve a lo largo de la red siguiendo su ruta elegida o predeterminada hasta llegar a su nodo de destino. Sus velocidades y posiciones se actualizan de acuerdo con las reglas de “coche de seguimiento” y las reglas de circulación.
7. Cálculo de emisiones: Se calculan las emisiones de cada vehículo y su consumo de acuerdo con su velocidad instantánea y su aceleración. Para ello se emplean las funciones de la ecuación (4) y los valores de la tabla de constantes.
8. Recopilación de datos: Se recogen los datos relativos a tiempo de viaje, retrasos, velocidad, flujo, longitud de la cola, las emisiones y el consumo de combustible.
9. Actualización de control de tráfico: Para cada cruce señalizado, se actualiza el cambio de etapa del reloj de acuerdo con los planes de señal deseados.
10. Incremento de tiempo: El reloj de la simulación sufre un incremento de una unidad por lo que se actualiza el valor de t a $t=t+1$.

Una vez se haya llegado al punto 10 se vuelve al punto 5 y esto se repetirá hasta que se cumpla el tiempo de simulación estipulado.

Se puede observar como el nuevo modelo de emisiones se incorpora a la estructura en el punto 7, por lo tanto, es una parte integral del proceso de iteración de la simulación.

Finalmente cabe destacar que para que un modelo proporcione resultados fiables ha de estar calibrado y validado frente a las observaciones de la vida real, por ello los datos que se van a introducir en Aimsun son reales.

4.2.3.4 Lista de notaciones utilizada

- n = Número de vehículo en un único flujo de tráfico y que está precedido por el vehículo $n-1$.
- τ = Tiempo de reacción del conductor medido en segundos.
- $v_n(t)$ = Velocidad del vehículo n en (m/s) en el instante t .
- v_n^{des} = La velocidad deseada por el vehículo n en (m/s)
- $a_n(t + \tau)$ = La aceleración del vehículo n en el instante $t+\tau$.
- a_n^{max} = La aceleración máxima que el vehículo n desea llevar a cabo en (m/s²)

- d_n = La deceleración máxima que el vehículo n quiere llevar a cabo en (m/s^2) y siempre menor que cero.
- d = Una estimación de d_n en (m/s^2) utilizada por el conductor del vehículo n y menor que cero.
- $x_n(t)$ = La posición del vehículo n en el instante t en metros.
- $s_n(t)$ = La distancia en metros entre el vehículo n u el n-1.
- L_{n-1} = La longitud del vehículo n-1 en metros.
- s_n^{min} = La distancia mínima que el vehículo n quiere mantener con el vehículo n-1.
- C_0 = Una constante que representa la sensibilidad de los conductores (s^{-1}).
- c_1, c_2, c_3 = Los parámetros de “coche de seguimiento”.
- E_0 = El límite inferior de emisiones (g/s)
- $E_n(t)$ = Las emisiones del vehículo n en el instante t.
- $f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6$ = Los factores de emisión.

4.2.4 Implementación del modelo Panis et al (2006) en Aimsun Next

Como se ha comentado anteriormente Aimsun Next es capaz de modelar de manera instantánea las emisiones producidas por la velocidad y la aceleración y deceleración de los vehículos que han aparecido en la red.

Para cada paso de la simulación se miden las emisiones para cada contaminante utilizando la misma fórmula (4), pero considerando diferentes valores de los factores dependiendo del tipo de vehículo, el tipo de combustible y las medidas de aceleración y deceleración instantáneas.

Aimsun Next permite calcular las emisiones de los siguientes gases contaminantes:

- Dióxido de carbono (CO_2)
- Óxidos de nitrógeno (NO_x)
- Componentes orgánicos volátiles (VOC)
- Partículas en suspensión (PM)

4.2.4.1 Parámetros de entrada

Cada tipo de vehículo que ofrece el programa (coche, autobús, camión, etc) tienen que tener los parámetros de emisión instantáneos definidos. Esto se puede hacer desde el editor de cada tipo de vehículo.

A continuación, se puede ver la ventana donde el usuario ha de definir dichos parámetros de entrada:

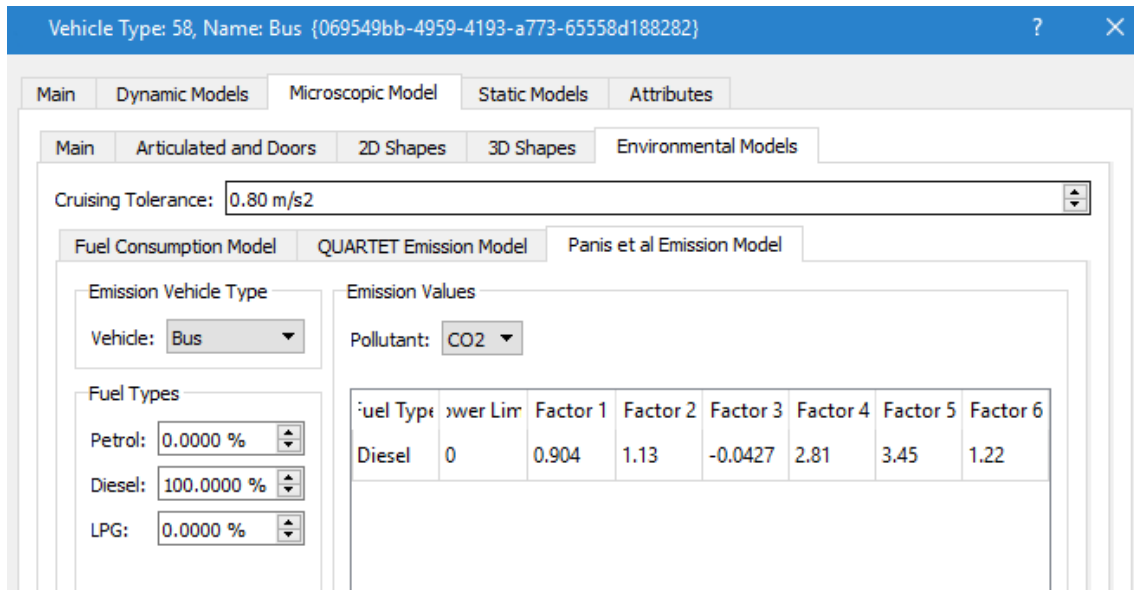


Ilustración 4.2-2 Interfaz del modelo Panis et al (2006) en Aimsun Next. Fuente: Aimsun Next

Como se puede ver para cada tipo de vehículo hay que señalar que porcentaje que aparezca durante la simulación serán diésel y gasolina. También hay que determinar el valor de los diferentes factores ($f1$ a $f6$) y la tolerancia de cruceo medida en m/s^2 .

4.2.4.2 Parámetros de salida

Una vez que la simulación haya ejecutado, se agregarán o series temporales a las secciones, nodos y giros de la replicación utilizada, dos para cada tipo de contaminante dando los resultados en gramos y en g/km. Este último dato será etiquetado como “interurbano”.

Por defecto saldrán los resultados equivalentes a la totalidad de la red, pero si se quieren consultar los resultados obtenidos para una única sección o cualquier otro elemento de la red se puede acceder a ellos en el editor de dicho elemento en la pestaña de series temporales.

A continuación, se puede ver las 8 series temporales para el tipo de vehículo “coche” tal y como se muestran por defecto tras ejecutarse la simulación:

Emisión IEM - CO2 - car	5282584,79	ND	g
Emisión IEM - NOx - car	8705,30	ND	g
Emisión IEM - PM - car	1132,82	ND	g
Emisión IEM - VOC - car	15808,49	ND	g
Emisión IEM - CO2 - Interurbano - car	284242,18	ND	g/km
Emisión IEM - NOx - Interurbano - car	468,41	ND	g/km
Emisión IEM - PM - Interurbano - car	60,95	ND	g/km
Emisión IEM - VOC - Interurbano - car	850,61	ND	g/km

Ilustración 4.2-3 Sumario de resultados emisiones. Fuente: Aimsun Next

4.3 Pasos previos a la simulación

Previamente a la ejecución de la simulación de los modelos es necesario llevar a cabo una serie de pasos preparativos que se pasan a describir en los apartados siguientes.

4.3.1 Tipo de modelo y creación de la red

Como se adelantaba anteriormente Aimsun Next permite utilizar tres tipos de modelos: microscópico, macroscópico y mesoscópico (mixto entre micro y macro).

Por ello, para conseguir los objetivos que se han planteado en este proyecto el modelo más adecuado es el microscópico ya que permite realizar un estudio vehículo a vehículo, además de características dinámicas de la red y comportamiento de flujo vehicular como pueden ser los tiempos de espera, la formación de colas, etc.

En el caso del estudio de las emisiones el modelo microscópico también es el más adecuado ya que calcula las emisiones producidas por cada vehículo atendiendo a las características del mismo en cada instante de la simulación, lo que permite obtener datos mucho más precisos y realistas.

Todo esto sumado a que el área de estudio abarca un barrio de 82 hectáreas hace que el estudio microscópico sea el más adecuado.

La elección de llevar a cabo un estudio microscópico también ha llevado a elegir el modelo de cálculo de emisiones de Panis et al (2006) que es el que se emplea en este tipo de estudios. Aimsun ofrece la posibilidad de emplear otro modelo QUARTET (1992) pero ese es adecuado en el caso de modelos macroscópicos.

Todos los aspectos referentes a la creación de la red y la preparación de los escenarios dinámicos para llevar a cabo las replicaciones de las diferentes simulaciones, así como la obtención de datos y creación de vistas está debidamente explicado y descrito en el apartado de la Guía de Aimsun, por lo tanto en este apartado se llevará a cabo la descripción de los datos de entrada necesarios para llevar a cabo la simulación una vez que la red ha sido creada y el funcionamiento de la misma es correcto.

La imagen que se muestra a continuación representa la red en el programa Aimsun Next:



Ilustración 4.3-1 Representación La Rondilla en Aimsun Next. Fuente: Aimsun Next

Los círculos que se ven en la imagen representan los nodos de origen y destino desde donde surgen y donde terminan los vehículos de la red. Representados en la imagen que se ha utilizado antes para mostrar el área de estudio están situados en los siguientes puntos:



Ilustración 4.3-2 Accesos al barrio de La Rondilla. Fuente: Elaboración propia

Los puntos azules representan en la imagen real los nodos de entrada y salida a la red y son los puntos donde se situaron los entrevistadores que recabaron los datos a pie de calle.

4.3.2 Datos de demanda

Como se comentaba anteriormente los datos de demanda fueron recabados mediante encuestas a pie de calle. Los datos con los que cuenta el departamento que dirige este proyecto y con los que se han trabajado fueron recogidos durante los días 26, 27, 28 y 29 de noviembre de 2015. La duración de dichas encuestas duró como máximo 30 segundos por conductor y se realizó en los puntos azules indicados en la imagen anterior que representan además las principales vías de acceso al barrio de La Rondilla.

Al ser datos algo desfasados se han adaptado de la siguiente manera: En la provincia de Valladolid en 2015 (momento en el que se recabaron los datos) había 251.326 turismos y en 2019 (último dato aportado por la DGT) hay 265.268 turismos en la provincia. Eso supone un aumento de un 5.54% por lo tanto lo que se ha hecho es aumentar la demanda de las matrices también en un 5.54% y de este modo los datos con los que se trabaje son más realistas.

Una vez que han sido recabados los datos, estos han de ser introducidos en el software Aimsun a través de matrices O/D.

Las matrices O/D representan el número de vehículos que van desde un nodo de origen a un nodo de destino, también denominados “centroides” en un periodo de tiempo determinado. En este estudio se trabaja con cuatro matrices para coches que contienen los datos de demanda para 30 minutos. Por lo tanto, las matrices con las que se trabaja son:

- Matriz O/D 13.00-13.30
- Matriz O/D 13.30-14.00
- Matriz O/D 14.00-14.30
- Matriz O/D 14.30-15.00

De este modo se simulará un total de 2 horas que se corresponde con el pico de demanda de viajes en la ciudad de Valladolid.

Cabe destacar que dichas matrices O/D se describen para periodos de tiempo determinado y para cada tipo de vehículo. Por lo tanto, si por ejemplo quisiéramos realizar un estudio en el que conviviesen coches y camiones tendríamos que duplicar el número de matrices: 4 para coches y 4 para camiones.

4.3.3 Cálculo de emisiones

Como se determinó en el apartado donde se describe el modelo Panis et al (2006) que es el que emplea Aimsun para el cálculo de las emisiones son tres los datos que el usuario ha de introducir en este sentido:

- Porcentaje de vehículos diésel y gasolina.
- Valor de los factores ($f1$ a $f6$).
- Tolerancia de crucero (m/s^2)

En el caso del porcentaje de vehículos que corresponden a cada tipo de vehículo utilizaremos la información aportada por la DGT (2018) para la provincia de Valladolid.

Por lo tanto, el estudio se realizará estableciendo que un 40,47% de los vehículos utilizarán gasolina, un 59,33% utilizarán diésel y el 0,2% restante equivalente a otro tipo de combustible que será denominado como LPG.

Una vez establecido el porcentaje de vehículos que emplean cada tipo de combustible hay que determinar el valor de los factores ($f1$ a $f6$) que emplea el modelo matemático utilizado por el software para el cálculo de las emisiones producidas.

Dichos factores adquieren valores diferentes para cada tipo de vehículo, para cada tipo de combustible y para cada contaminante.

En el estudio realizado por Panis et al (2006) donde se describe el modelo de cálculo de emisiones se muestra una tabla donde aparecen todos los valores de los factores que se obtuvieron mediante el estudio empírico. Por lo tanto, es razonable que para el estudio que se realiza en el presente trabajo utilicemos dichos valores. En la tabla que se muestra a continuación aparecen los valores de los factores para cada tipo de contaminante, tipo de vehículo y combustible utilizado:

FACTORES UTILIZADOS POR CONTAMINANTE Y TIPO DE VEHÍCULO								
CONTAMINANTE	TIPO DE VEHÍCULO	E ₀	f ₁	f ₂	f ₃	f ₄	f ₅	f ₆
CO ₂	GASOLINA	0	0,553	0,161	-0,00289	0,266	0,511	0,183
	DIESEL	0	0,324	0,0859	0,00496	-0,0586	0,448	0,23
	LPG	0	0,6	0,219	-0,00774	0,357	0,514	0,17
	HDV	0	1,52	1,88	-0,0695	4,71	5,88	2,09
	BUS	0	0,904	1,13	-0,0427	2,81	3,45	1,22
NO _x	GASOLINA(a≥-0,5 m/s ²)	0	0,000619	0,00008	-0,00000403	-0,000413	0,00038	0,000177
	GASOLINA(a<-0,5 m/s ²)	0	0,000217	0	0	0	0	0
	DIESEL(a≥-0,5 m/s ²)	0	0,00241	-0,000411	0,0000673	-0,00307	0,00214	0,0015
	DIESEL(a<-0,5 m/s ²)	0	0,00168	-0,0000662	0,000009	0,00025	0,000291	0,00012
	LPG(a≥-0,5 m/s ²)	0	0,000892	0,0000161	-0,000000806	-0,00000823	0,000076	0,0000354
	LPG(a<-0,5 m/s ²)	0	0,000343	0	0	0	0	0
	HDV	0	0,0356	0,00971	-0,00024	0,0326	0,0133	0,0015
	BUS	0	0,0236	0,00651	-0,00017	0,0217	0,00894	0,00012
VOC	GASOLINA(a≥-0,5 m/s ²)	0	0,000447	0,00000732	-2,87E-08	-0,00000341	0,00000494	0,0000354
	GASOLINA(a<-0,5 m/s ²)	0	0,00263	0	0	0	0	0
	DIESEL(a≥-0,5 m/s ²)	0	0,0000922	0,00000909	-0,000000229	-0,000022	0,0000169	0,0115
	DIESEL(a<-0,5 m/s ²)	0	0,0000525	0,00000722	-0,000000187	0	-0,0000102	0,00757
	LPG(a≥-0,5 m/s ²)	0	0,0144	0,000000174	-6,82E-09	-0,000000811	0,00000118	0,00000166
	LPG(a<-0,5 m/s ²)	0	0,00842	0	0	0	0	0
	HDV	0	0,00104	0,000487	0,0000149	0,00127	0,00021	0,00000375
	BUS	0	0,00155	0,00082	0,0000242	0,00186	0,000321	-0,00000422
PM	GASOLINA	0	0	0,0000157	0,000000921	0	0,0000375	0,000000396
	DIESEL	0	0	0,000313	0,00000184	0	0,00075	0
	LPG	0	0	0,0000157	0,000000921	0	0,0000375	0,00000189
	HDV	0	0,000214	0,000335	0,0000222	0,00207	0,0018	0,000227
	BUS	0	0,000223	0,000347	0,0000238	0,00208	0,00176	0,000223

Tabla 4.3-1 Valor de los factores en función del gas y del tipo de vehículo. Fuente: Panis et al (2006)

Tal y como aparecen en dicha tabla han sido introducidos en el software Aimsun.

Por último, habría que determinar el valor de la tolerancia de cruce. Este valor hace referencia a que todos aquellos vehículos que en un instante determinado tengan una aceleración por debajo del valor indicado se considerará que se encuentran en velocidad de cruce con velocidad constante. En el apartado donde se describe el modelo se determina que se considerará velocidad de cruce a las aceleraciones comprendidas entre -0,5 y 0,5 m/s². Por defecto el programa establece una tolerancia de cruce de 0,8 m/s². Por lo tanto, para el estudio se determinará un valor medio entre ambos de 0,7 m/s².

Una vez que todos estos valores han sido introducidos la ventana de edición del programa tendría un aspecto como este:

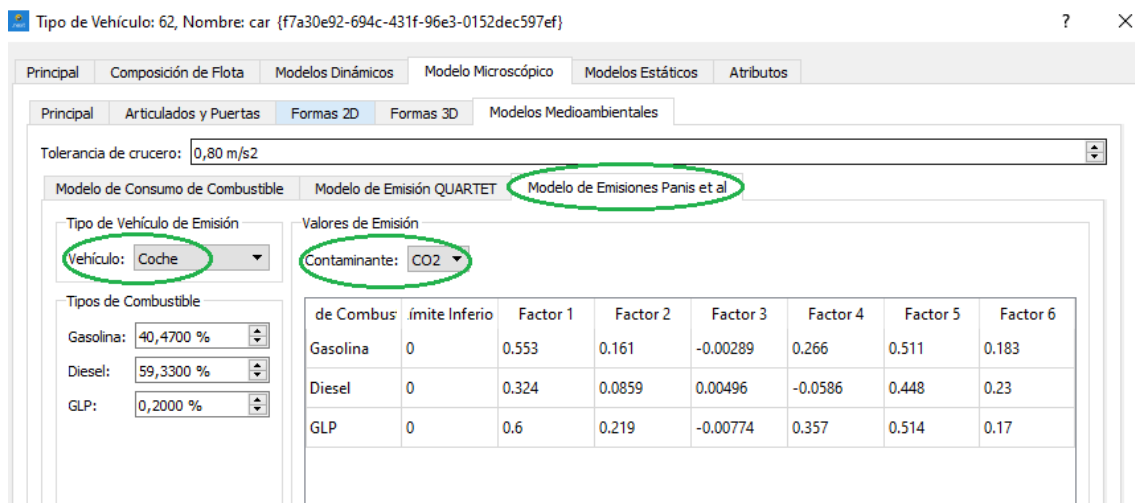


Ilustración 4.3-3 Selección del modelo de emisiones en Aimsun Next. Fuente: Aimsun Next

4.4 Análisis de la movilidad en Valladolid y La Rondilla

Para entender e interpretar correctamente los resultados que se obtengan de las sucesivas simulaciones, es preciso llevar a cabo un análisis de la movilidad en la ciudad de Valladolid, para que de este modo interpretar mejor en que medida afecta a las personas las medidas que se van a estudiar.

Un aspecto muy importante que determina cómo se mueven los vecinos de una ciudad es el medio de transporte que eligen para desplazarse. En la tabla siguiente, obtenida del PIMUSSVA se observa como deciden moverse los ciudadanos de Valladolid:

Modo Básico	Viajes	%	Viajes/persona	Viajes/hogar
A pie	346.555	52,9	1,21	2,77
Transporte Público	85.538	13,1	0,3	0,68
Vehículo privado	196.874	30	0,68	1,58
Otros	26.349	4	0,09	0,21
Total general	655.316	100	2,28	5,24

Tabla 4.4-1 Medio empleado para los desplazamientos en Valladolid. Fuente: PIMUSSVA

Observamos como el vehículo privado y el transporte público constituyen casi la mitad (43,1%) de los modos de viaje elegidas por los ciudadanos, además de esta información también se traduce que los vecinos de Valladolid prefieren el vehículo privado antes que el transporte público, lo cual incide directamente sobre la cantidad de emisiones ya que si las personas optasen por el transporte público el nivel de emisiones bajaría al bajar el uso de vehículos privados.

Cabe destacar que el nivel de motorización está (el número de coches por hogar) directamente relacionado con los viajes en vehículo privado. En La Rondilla existe un nivel de motorización de 353 vehículos por cada mil habitantes mientras que en barrios con niveles de población similares como pueden ser Parquesol o Huerta del Rey existen niveles de motorización algo mayores. Sin embargo, hay que tener en cuenta que el área de La Rondilla es mucho menor por lo tanto la congestión vehicular será mucho mayor.

A continuación, se muestra una tabla comparativa entre los tres barrios:

BARRIO	POBLACION	MOTORIZACIÓN
La Rondilla	22.215	353
Parquesol	25.808	407
Huerta del Rey- Girón	24.413	432

Tabla 4.4-2 Población y motorización barrios similares a La Rondilla. Fuente: Elaboración propia

La diferencia de tamaño entre los tres barrios se puede apreciar en el siguiente mapa. Siendo La Rondilla el número 6, Parquesol el 9 y Huerta del Rey-Girón el 8:

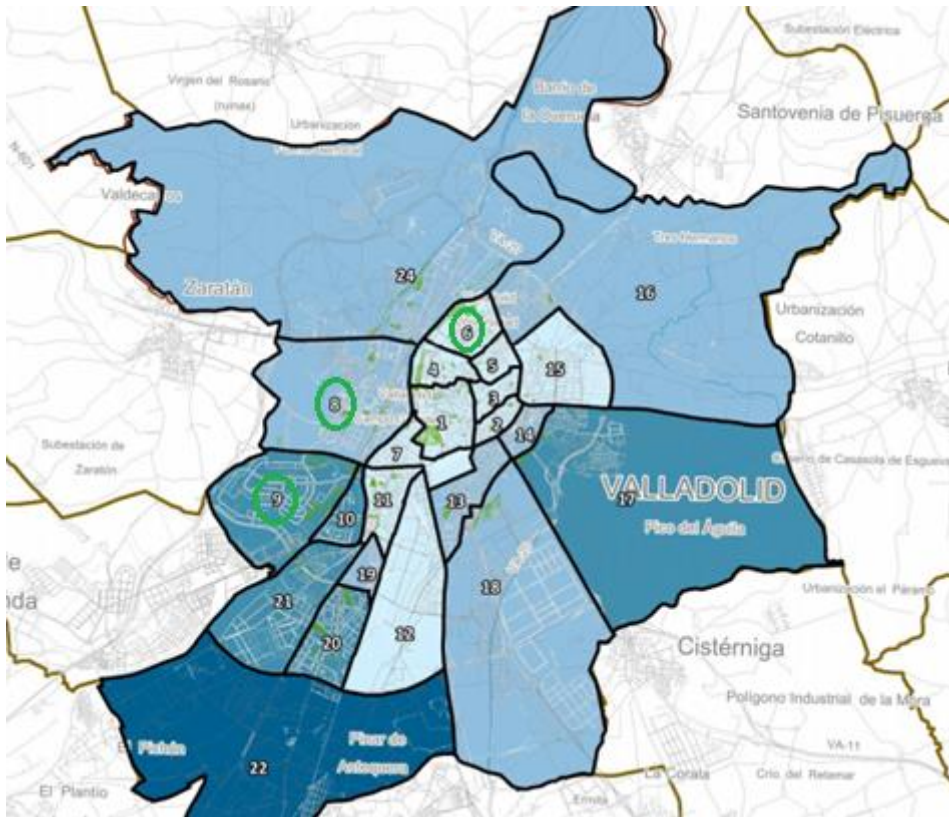


Ilustración 4.4-1 Mapa barrios de Valladolid. Fuente: PIMUSSVA

Por lo tanto, se puede concluir que La Rondilla sufre de una gran congestión vehicular.

Un aspecto importante que hay que tener en cuenta también es la distribución de los modos de transporte en función de la hora del día en la que se realice el viaje ya que eso determinará si para las horas escogidas para la simulación el uso del vehículo privado es elevada o no. En la siguiente tabla aportada por el PIMUSSVA se puede ver la distribución de los viajes según la hora del día y el modo seleccionado:

Hora	A pie		Transporte Público		Vehículo privado		Otros		Total	
	Nº viajes	%	Nº viajes	%	Nº viajes	%	Nº viajes	%	Nº viajes	%
6 - 7	864	0,2%	146	0,2%	6.011	3,1%	1.457	5,5%	8.479	1,3%
7 - 8	7.053	2,0%	3.892	4,5%	16.595	8,4%	998	3,8%	28.537	4,4%
8 - 9	21.022	6,1%	6.236	7,3%	19.888	10,1%	2.238	8,5%	49.383	7,5%
9 - 10	21.788	6,3%	4.001	4,7%	10.449	5,3%	1.634	6,2%	37.873	5,8%
10 - 11	23.259	6,7%	4.962	5,8%	4.536	2,3%	813	3,1%	33.571	5,1%
11 - 12	34.653	10,0%	5.874	6,9%	5.146	2,6%	610	2,3%	46.283	7,1%
12 - 13	35.748	10,3%	5.038	5,9%	4.910	2,5%	507	1,9%	46.204	7,1%
13 - 14	29.307	8,5%	7.040	8,2%	11.261	5,7%	2.266	8,6%	49.874	7,6%
14 - 15	26.907	7,8%	7.349	8,6%	22.855	11,6%	3.392	12,9%	60.502	9,2%
15 - 16	18.071	5,2%	4.907	5,7%	20.003	10,2%	2.292	8,7%	45.274	6,9%
16 - 17	12.906	3,7%	4.173	4,9%	9.884	5,0%	781	3,0%	27.744	4,2%
17 - 18	27.689	8,0%	8.460	9,9%	10.446	5,3%	1.393	5,3%	47.988	7,3%
18 - 19	23.451	6,8%	5.310	6,2%	11.013	5,6%	1.495	5,7%	41.270	6,3%
19 - 20	24.784	7,2%	5.584	6,5%	12.991	6,6%	876	3,3%	44.235	6,8%
20 - 21	20.456	5,9%	6.976	8,2%	12.761	6,5%	1.110	4,2%	41.302	6,3%
21 - 22	10.350	3,0%	3.353	3,9%	7.639	3,9%	1.127	4,3%	22.469	3,4%
22 - 5	8.247	2,4%	2.236	2,6%	10.485	5,3%	3.359	12,8%	24.328	3,7%
Total	346.555	100,0%	85.538	100,0%	196.874	100,0%	26.349	100,0%	655.316	100,0%

Ilustración 4.4-2 Desplazamientos según medio de transporte y franja horaria. Fuente: PIMUSSVA

El primer dato destacable es que en la franja horaria de las 13.00 a las 15.00 horas es el momento del día que más desplazamientos se hacen (16,8%). Cabe destacar también que entre las 14.00 y las 15.00 es el momento del día en el que más se utiliza el vehículo privado (11,6%) y el segundo momento del día en el que más se utiliza el transporte público (8,6%). Por lo tanto, el periodo que abarca la simulación que se va a realizar para el estudio del tráfico es el idóneo para analizar tanto las condiciones del tráfico como la cantidad de emisiones contaminantes producidas.

Finalmente, y para destacar otra vez que el barrio de La Rondilla resulta especialmente interesante para el estudio de tráfico por la movilidad que se genera en sus calles se muestra a continuación, el ratio de viajes generados y atraídos por zonas dentro de Valladolid. En la siguiente tabla aparece el número de viajes atraídos y generados para todos los barrios de Valladolid por lo tanto se puede hacer una comparativa entre barrios de características similares a La Rondilla (población, área, etc).

Macrozona	Denominación	Generados		Atraídos		Ratio Generados/ Atraídos
		Viajes	%	Viajes	%	
1	CENTRO	68.117	10,4%	109.975	16,8%	0,62
2	PLAZA CIRCULAR - VADILLOS	30.235	4,6%	16.528	2,5%	1,83
3	SAN JUAN - BATALLAS	27.342	4,2%	24.750	3,8%	1,10
4	SAN NICOLÁS	26.720	4,1%	25.581	3,9%	1,04
5	UNIVERSIDAD - HOSPITAL	21.165	3,2%	19.299	2,9%	1,10
6	RONDILLA - SANTA CLARA - 25 AÑOS DE PAZ	44.634	6,8%	29.877	4,6%	1,49
7	PASEO DE ZORRILLA NORTE	29.162	4,5%	25.820	3,9%	1,13
8	HUERTA DEL REY - GIRÓN	47.475	7,2%	45.397	6,9%	1,05
9	PARQUESOL	43.703	6,7%	38.545	5,9%	1,13
10	ARTURO EYRIES	9.008	1,4%	5.247	0,8%	1,72
11	PASEO DE ZORRILLA SUR	46.182	7,0%	38.245	5,8%	1,21
12	POLIGONO ARGALES - ARCA REAL	4.760	0,7%	17.507	2,7%	0,27
13	DELICIAS	68.236	10,4%	33.596	5,1%	2,03
14	PAJARILLOS BAJOS	28.270	4,3%	20.388	3,1%	1,39
15	BELEN - PILARICA	14.838	2,3%	28.704	4,4%	0,52
16	BARRIO ESPAÑA - SAN PEDRO REGALADO	12.121	1,8%	10.241	1,6%	1,18
17	LAS FLORES - PAJARILLOS ALTOS	11.712	1,8%	12.833	2,0%	0,91
18	POLIGONO DE SAN CRISTOBAL	17.025	2,6%	36.462	5,6%	0,47
19	LA RUBIA	13.555	2,1%	8.372	1,3%	1,62
20	PARQUE ALAMEDA - COVARESA - PAULA LOPEZ	20.191	3,1%	10.216	1,6%	1,98
21	SAN ADRIAN - LAS VILLAS - SANTA ANA	8.163	1,2%	20.579	3,1%	0,40
22	PINAR DE ANTEQUERA	2.534	0,4%	8.603	1,3%	0,29
23	PUENTE DUERO	1.152	0,2%	1.455	0,2%	0,79
24	LA VICTORIA - FUENTE BERROCAL - LA OVERUELA	41.751	6,4%	32.223	4,9%	1,30
27	RESTO DE ALFOZ DE VALLADOLID	3.097	0,5%	17.926	2,7%	0,17
99	EXTERIOR	14.168	2,2%	16.948	2,6%	0,84
Total general		655.316	100,0%	655.316	100,0%	

Ilustración 4.4-3 Viajes atraídos y generados por los barrios de Valladolid. Fuente: PIMUSSVA

Vemos como los valores de viajes generados y viajes atraídos entre barrios de poblaciones similares como son La Rondilla, Parquesol y Huerta del Rey-Girón son similares o incluso algo mayores en los dos últimos. Sin embargo, como se destacaba anteriormente La Rondilla tiene un área mucho menor por lo tanto la intensidad de tráfico será mucho mayor.

Otro aspecto que se deduce de la tabla es que en La Rondilla se generan muchos más viajes de los que se atraen, esto puede ser explicado por ser un barrio donde existen una

gran cantidad de viviendas, por lo tanto, la gente parte de allí para ir a trabajar a otras zonas de la ciudad.

En el siguiente mapa se puede ver de una manera más visual como La Rondilla genera una gran cantidad de viajes al día:

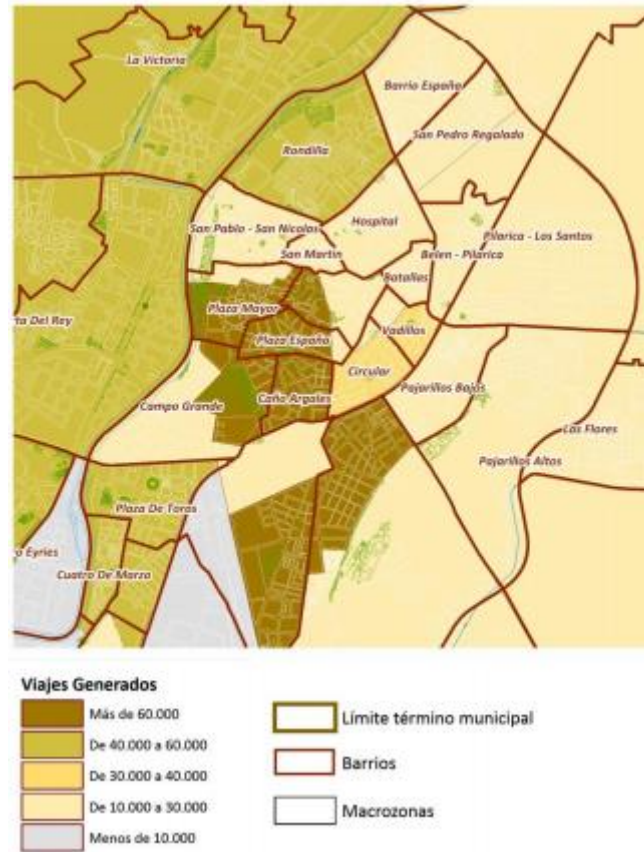


Ilustración 4.4-4 Mapa de generación de viajes por barrios. Fuente: PIMUSSVA

Con toda la información aportada en este apartado y convenientemente analizada ya se puede proceder a realizar las simulaciones y los datos que generen de ellas podrán ser analizados con un criterio más fundado y realista.

4.5 Simulación, análisis y comparación de los modelos

El presente apartado se va a estructurar de manera similar para los tres modelos que se van a estudiar. En primer lugar, se describe en que consiste el modelo y a continuación se lleva a cabo el análisis de las emisiones y de los parámetros que definen el tráfico.

4.5.1 Modelo 1: Sin restricciones

El modelo 1 de la simulación se corresponde con el funcionamiento normal y sin ningún tipo de restricción del tráfico de La Rondilla. Esta simulación aportará datos que permitirán conocer la situación actual tanto de las características del tráfico como de las emisiones contaminantes que se producen.

Una vez que se hayan generado y analizado dichos datos, serán empleados para llevar a cabo comparaciones con los que se generen en las simulaciones de los modelos que incorporan restricciones de tráfico y de esta manera se podrán obtener conclusiones acerca de las ventajas e inconvenientes de la aplicación en la vida real de dichos modelos.

4.5.1.1 Caracterización del tráfico: Parámetros globales

1. Flujo (Vehículos/hora)

El flujo es uno de los factores más significativos que describen el tráfico en una red ya que muestra de una manera muy clara la demanda que se está haciendo de dicha red.

A continuación, se muestra una gráfica que ha sido elaborada con los datos obtenidos tras la simulación, que muestra el flujo medio de vehículos en la red a lo largo de las dos horas de simulación.

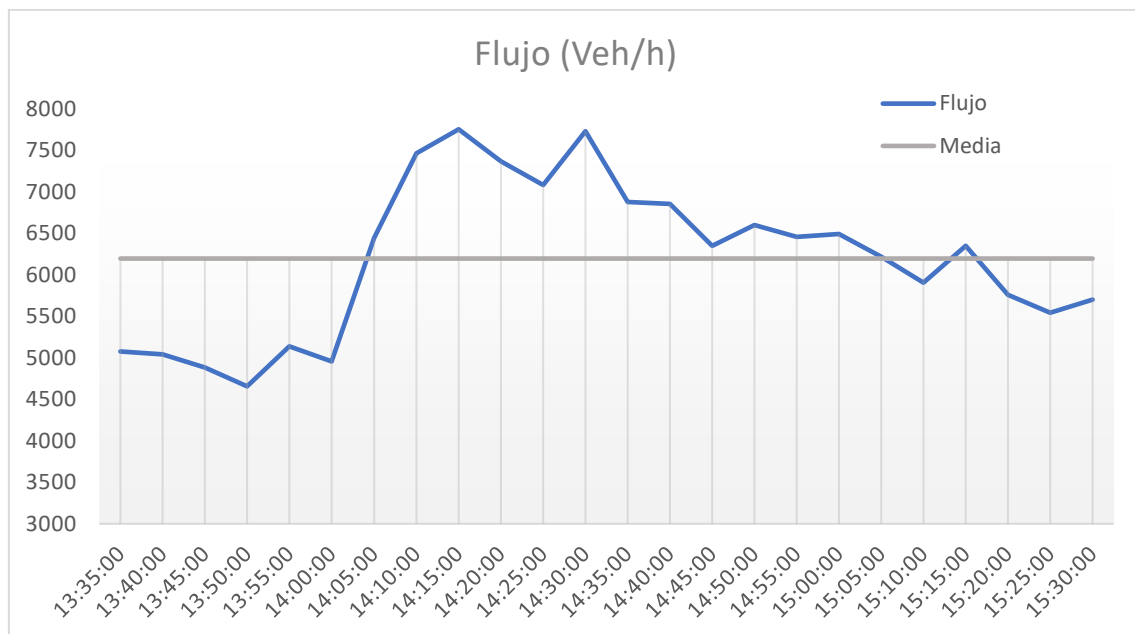


Gráfico 4.5-1 Flujo Modelo 1. Fuente: Elaboración propia

FLUJO (Veh/h)	
Media	6.195
Máximo	7.752
Mínimo	4.656

Tabla 4.5-1 Datos de Flujo Modelo 1. Fuente: Elaboración propia

Se puede observar cómo desde las 13:35 hasta las 14:00 el flujo se mantiene constante y por debajo del flujo medio de la red. A partir de las 14:00 se experimenta un gran aumento del flujo hasta alcanzar el máximo a las 14:15. Se mantiene en valores por encima de la media hasta las 15:05 aunque desciende desde las 14:30. A partir de las 15:20 se recuperan valores algo mayores pero similares a los de antes de la hora punta.

Como se ha podido ver las horas punta se podrían considerar las 14:15 y las 14:30. A continuación, se muestra una imagen de las calles de La Rondilla coloreadas en función del flujo que tienen a las 14:15. La escala de colores utilizada va desde el verde para flujos bajos hasta el rojo intenso para flujos elevados pasando por tonalidades intermedias (amarillo, naranja).



Ilustración 4.5-1 Mapa de flujo a las 14:15 La Rondilla. Fuente: Aimsun Next

2. Densidad (Vehículos/km)

La densidad de tráfico es un factor significativo ya que da información acerca de la congestión de la red ya que indica el número de vehículos dentro del espacio existente. A continuación, se puede ver el comportamiento de la densidad a lo largo de las dos horas de simulación:

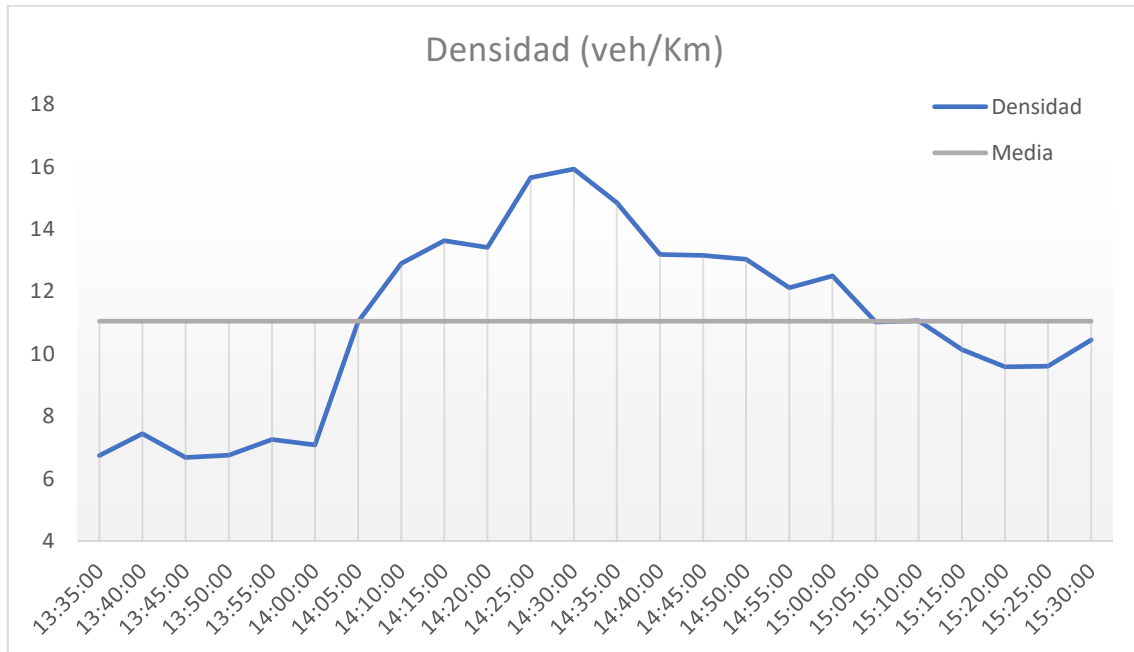


Gráfico 4.5-2 Densidad Modelo 1. Fuente: Aimsun Next

DENSIDAD (Veh/Km)	
Media	11,05
Máximo	15,93
Mínimo	6,68

Tabla 4.5-2 Datos de densidad Modelo 1. Fuente: Elaboración propia

Se puede observar como la gráfica de la densidad se corresponde con la de flujo ya que ambos factores son directamente proporcionales. En este caso se ve como, al igual que el flujo, la densidad se mantiene constante e inferior a la media hasta las 14:00 que comienza a ascender. En este caso el máximo se alcanza a las 14:30 y a partir de ese momento desciende levemente hasta situarse de nuevo por debajo de la media a las 15:10.

3.Velocidad (Km/h)

Los valores que a continuación se van a mostrar hacen referencia a la velocidad media de los vehículos de la red en cada momento de la simulación:

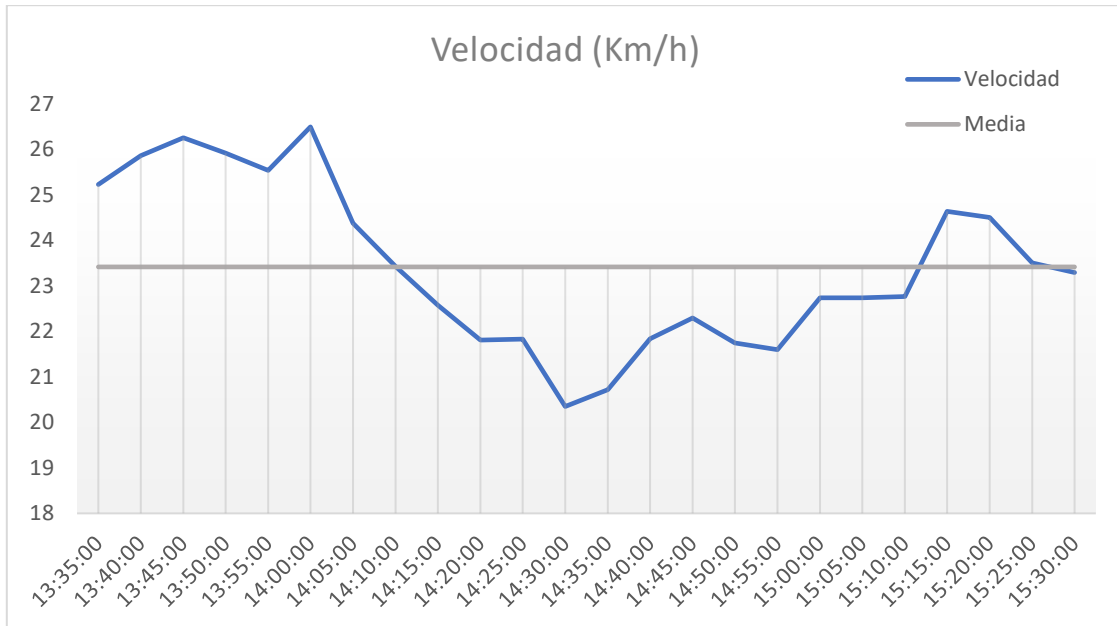


Gráfico 4.5-3 Velocidad Modelo 1. Fuente: Elaboración propia

VELOCIDAD (Km/h)	
Media	23,42
Máxima	26,25
Mínima	20,35

Tabla 4.5-3 Datos Velocidad Modelo 1. Fuente: Elaboración propia

La velocidad media de los vehículos que se encuentran en la red se relaciona de manera inversamente proporcional con el flujo y la densidad. En el gráfico esto se confirma ya que la velocidad permanece constante y por encima de la media hasta las 14:00 que desciende a causa del aumento del flujo y la densidad. Cuando estos factores comienzan a disminuir la velocidad media aumenta levemente hasta situarse de nuevo por encima de la media a las 15:10.

4.Vehículos entrantes (veh)

En el gráfico que se ve a continuación se puede ver una comparativa entre los vehículos que entran en la red en cada momento y los vehículos que se encuentran dentro de la misma. Esta gráfica guarda relación con la de flujo y densidad ya que a medida que aumenta el número de vehículos que entran dentro de la red aumentará también el flujo y la densidad.

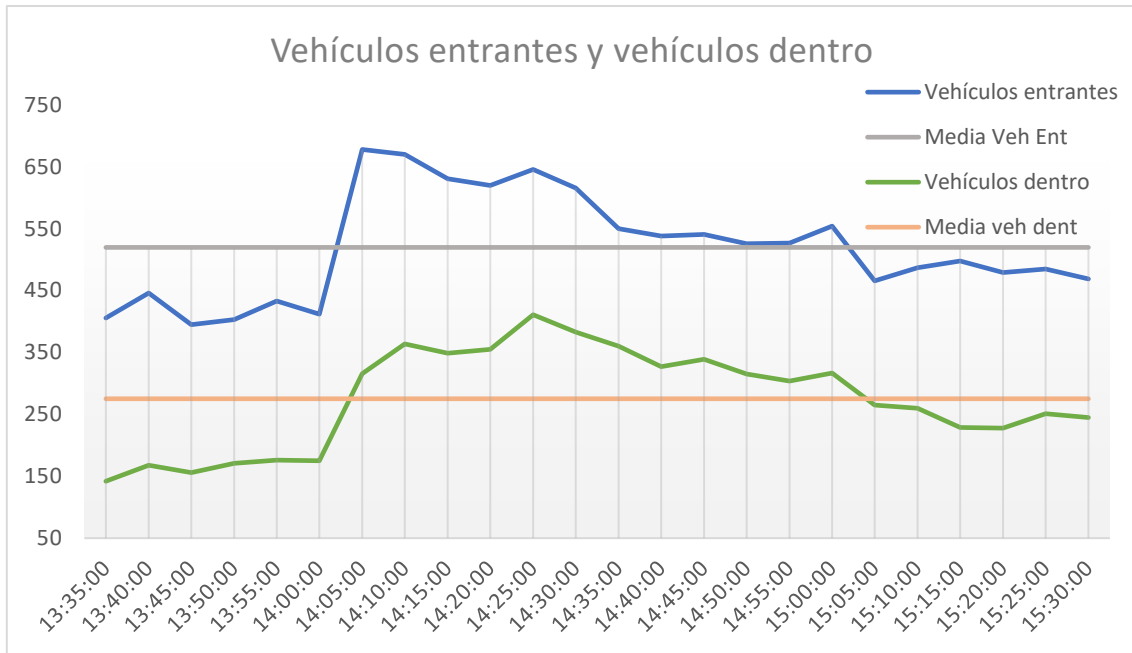


Gráfico 4.5-4 Vehículos entrantes y vehículos dentro Modelo 1. Fuente: Elaboración propia

VEHICULOS ENTRADA (Veh)	
Media	512
Máximo	678
Mínimo	395

Tabla 4.5-4 Datos vehículos entrantes Modelo 1. Fuente: Elaboración propia

VEHICULOS DENTRO (Veh)	
Media	275,25
Máximo	411
Mínimo	142

Tabla 4.5-5 Datos vehículos dentro Modelo 2. Fuente: Elaboración propia

Vemos como a partir de las 14:00 tanto el número de vehículos que entran en la red como el de vehículos que se encuentran circulando por ella aumenta 14:25 comienza a descender levemente. Este comportamiento se repite tanto en la gráfica de flujo como en la de densidad.

5. Tiempo de viaje y tiempo de demora (s/km)

El tiempo de viaje muestra en segundos lo que tarda un vehículo que se encuentra circulando por la red en recorrer un kilómetro.

Por otra parte, el tiempo de demora define el retraso que sufre un vehículo determinado debido a las condiciones de capacidad de la vía respecto a una situación ideal en la que la única limitación sería la velocidad permitida de la vía. El tiempo de demora se define de la siguiente manera:

$$TD = TT - TFF$$

Ecuación 4.5-1 Tiempo de demora

Siendo:

- TD = Tiempo de demora
- TT = Tiempo de viaje en las condiciones actuales de la vía
- TFF = Tiempo que se tardaría en condiciones ideales

A continuación, se puede ver un gráfico comparativo donde se muestra el tiempo de viaje y el tiempo de demora a lo largo de las dos horas de simulación:

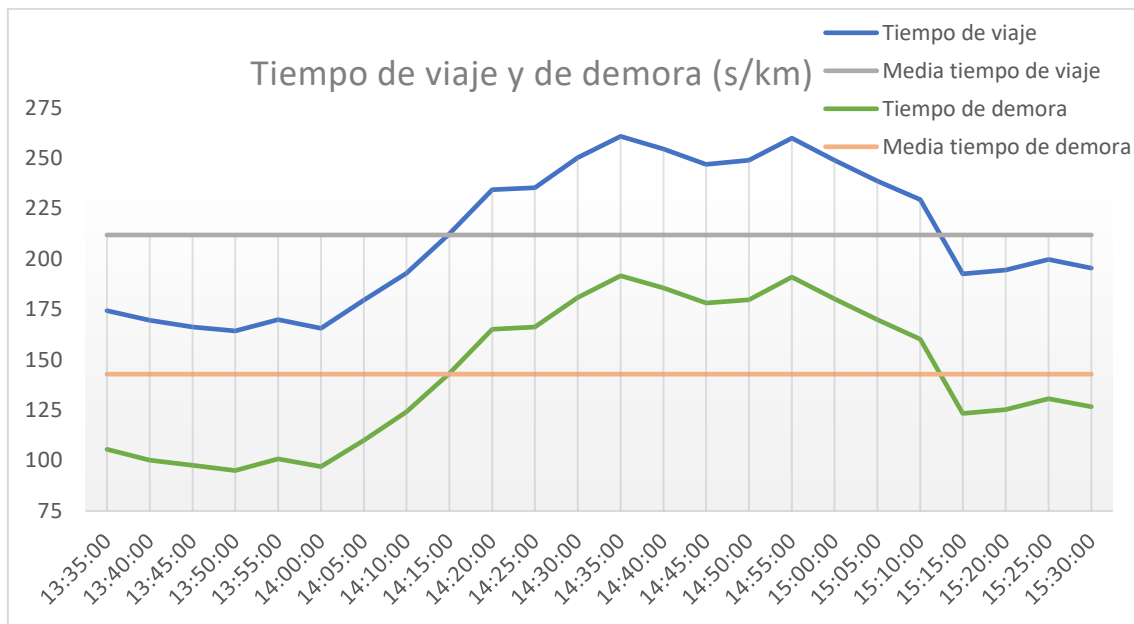


Gráfico 4.5-5 Tiempo de viaje y de demora Modelo 1. Fuente: Elaboración propia

TIEMPO DE VIAJE (s/km)	
Media	211,9
Máximo	260,82
Mínimo	164,3

Tabla 4.5-6 Datos tiempo de viaje Modelo 1. Fuente: Elaboración propia

TIEMPO DE DEMORA (s/km)	
Media	142,86
Máximo	191,65
Mínimo	95,06

Tabla 4.5-7 Datos tiempo de demora Modelo 1. Fuente: Elaboración propia

6. Número de paradas y tiempo de parada

Estos dos factores están determinados por las condiciones del tráfico, ya que si existe una cierta congestión el número de paradas que habrá que realizar será mayor y su duración también aumentará, y también por la señalización vertical existente (semáforos, señales, etc).

El número de paradas y su duración afectará directamente al tiempo de viaje y al tiempo de demora vistos anteriormente.

En el gráfico inferior se puede ver que tanto el número de paradas como la duración de las mismas aumenta cuando lo hacen la densidad y el flujo y la velocidad disminuye, es decir, a partir de las 14:00. El número de paradas se mantiene más constante pero también experimenta un ligero aumento en la hora punta.

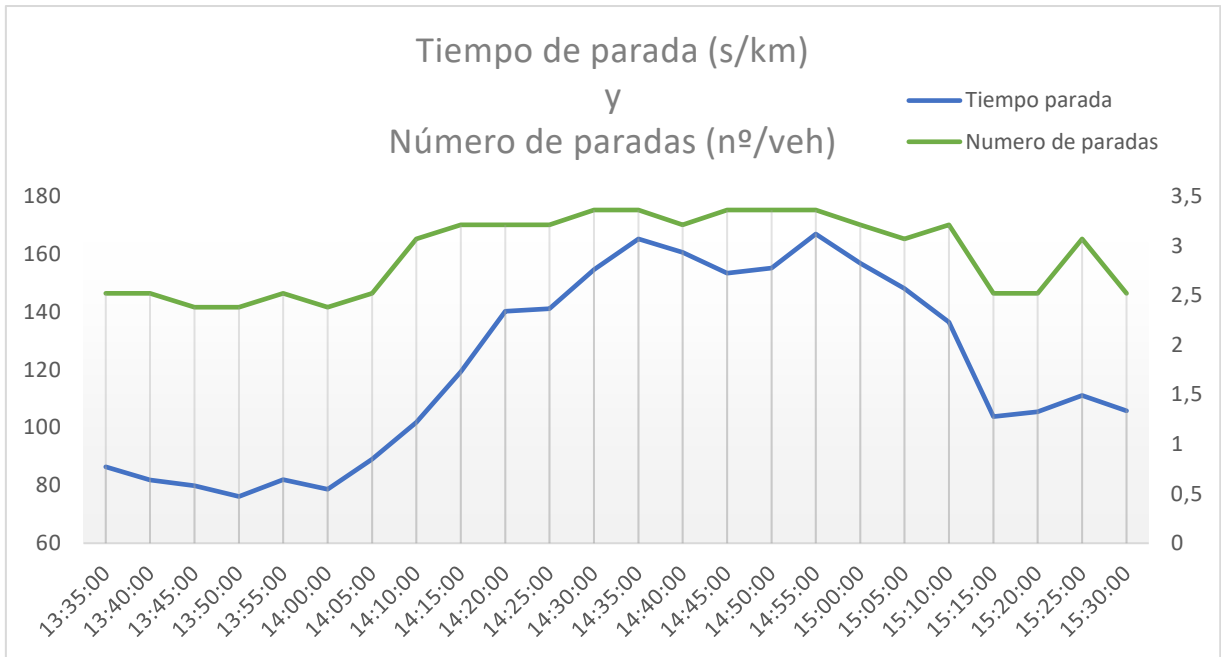


Gráfico 4.5-6 Tiempo de parada y número de paradas Modelo 1. Fuente: Elaboración propia

TIEMPO PARADAS (s/km)	
Media	120,82
Máximo	166,9
Mínimo	76,16

Tabla 4.5-8 Datos tiempo de parada Modelo 1. Fuente: Elaboración propia

Nº PARADAS (nº/veh)	
Media	2,92
Máximo	3,36
Mínimo	2,38

Tabla 4.5-9 Datos número de paradas Modelo 1. Fuente: Elaboración propia

A continuación, se puede ver una tabla que muestra dos datos que, aunque si son interesantes, no resultan muy útiles a la hora de analizar el comportamiento del tráfico dentro de la red. Estos datos son la distancia total recorrida y el tiempo total de viaje.

OTROS PARÁMETROS DE INTERÉS		
Parámetro	Valor	Unidades
Distancia Total Viajada	10584,29	Km
Tiempo total de viaje	565,39	Horas

Tabla 4.5-10 Otros parámetros de interés Modelo 1. Fuente: Elaboración propia

Otro aspecto importante dentro de la simulación es realizar un análisis del comportamiento de los parámetros estudiados en algunas de las calles más significativas de La Rondilla. Puesto que el principal interés de este proyecto reside en el análisis general de toda la red lo que se ha hecho es generar una tabla que muestra un sumario de los resultados obtenidos para algunos parámetros en las calles más significativas del barrio. Para cada calle se van a mostrar dos datos: la media del valor de ese parámetro en esa calle a lo largo de toda la simulación y su valor a las 14:30 como hora representativa de la hora punta.

La elección de estas calles se ha basado en aquellas que soportan un mayor flujo de vehículos a la hora punta y que se podían ver de manera muy visual en la imagen (X) del apartado de estudio de flujo.

Puesto que algunas calles están formadas por varias secciones los datos que se reflejan en la siguiente tabla hacen referencia a la sección más larga que compone la calle y que por lo tanto es más representativa.

CALLE	FLUJO (Veh/h)		DENSIDAD (Veh/km)		VELOCIDAD (km/h)	
	14:30	MEDIA	14:30	MEDIA	14:30	MEDIA
Rondilla de Santa Teresa Dirección Oeste	852	1929	61,03	21,09	32,66	47,11
Rondilla de Santa Teresa Dirección Este	2076	702	23,37	25,9	45,86	35,35
Tirso de Molina	684	503,5	40,27	36,94	32,72	36,26
Cardenal Toquemada	840	674	9,33	7,69	45,86	45,33
Av Palencia Dirección Sur	1044	857	77,03	25,55	22,16	30,49
Av. Palencia Dirección Norte	468	500	5,08	5,26	46,25	47,91
Cerrada	840	581	60,17	32,16	13,75	18,45
Soto	600	514	5,81	4,92	52,67	52,55
Paseo del Renacimiento	372	363	15,99	14,84	17,79	21,75
Mirabel	708	424	6,74	4,21	50,04	50,99

Tabla 4.5-11 Parámetros del tráfico por calles Modelo 1. Fuente: Elaboración propia

Se puede observar como todas son calles que soportan una gran cantidad de flujo y que a las 14:30 todas ellas soportan un flujo muy por encima del flujo medio. En el caso de calles como Rondilla de Santa Teresa o la Avenida de Palencia se entiende por ser arterias principales de la ciudad de Valladolid y que conectan distintas zonas de la ciudad con el centro y con la zona universitaria. Las calles Tirso de Molina, Paseo del renacimiento, Soto y Cerrada soportan mucho flujo por ser calles de acceso a La Rondilla y las calles Mirabel y Cardenal Torquemada son arterias principales dentro del barrio y que se comportan como arterias dentro del propio barrio.

4.5.1.2 Estudio de las emisiones

Una vez que se ha llevado a cabo la caracterización del tráfico a través de sus parámetros globales y que por lo tanto se conoce el comportamiento del tráfico en La Rondilla entre las 13:30 y las 15:30, se llevará a cabo un estudio y análisis de las emisiones que se producen durante ese periodo de simulación. Los contaminantes que se van a estudiar son:

- Dióxido de Carbono (CO₂)
- Óxidos de Nitrógeno (NO_x)
- Partículas en suspensión (PM)

A continuación, se muestra un mapa de La Rondilla que muestra el estado del barrio a las 14:15 (hora de mayor flujo) y las emisiones de CO₂ que en ese momento se producen.

De este modo se pueden ver las calles en las que la contaminación es mayor a través de un rango de colores similar al que se utilizó en el mapa que mostraba el flujo.

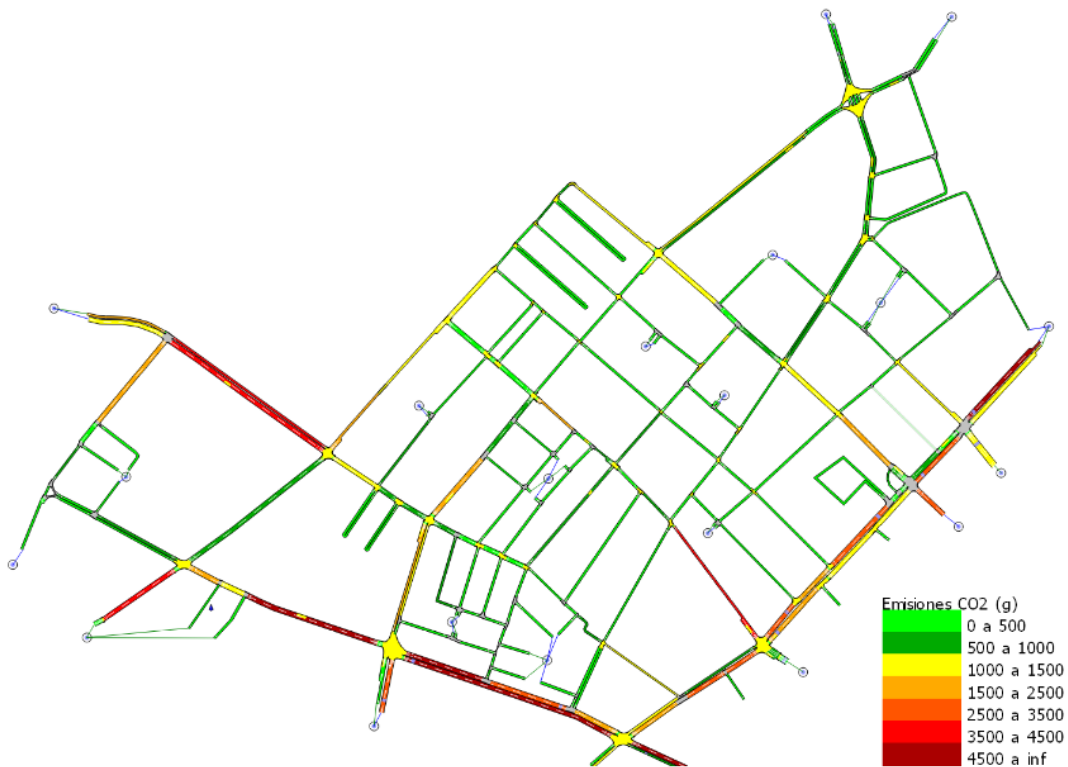


Ilustración 4.5-2 Mapa de color de emisiones de CO₂ en La Rondilla a las 14:15 Modelo 1. Fuente: Aimsun Next

Lo que representan los colores son los gramos de CO₂ que se han producido en cada una de las calles del barrio de La Rondilla a las 14:15. Como cabía esperar las calles que a esa hora soportan un mayor flujo son en las que se emite más CO₂. Especialmente preocupan las calles de Rondilla de Santa Teresa, Cerrada, Tirso de Molina y la Avenida de Palencia por producir altas cantidades de CO₂. En concreto la calle Cerrada preocupa por no ser una gran avenida sino ser una calle angosta con gran cantidad de viviendas.

A continuación, y guardando similitud con el procedimiento que se ha seguido para el estudio de los parámetros globales se van a mostrar gráficas para observar como es la evolución a lo largo de la simulación de las emisiones de los tres gases contaminantes que se estudian.

1.CO₂

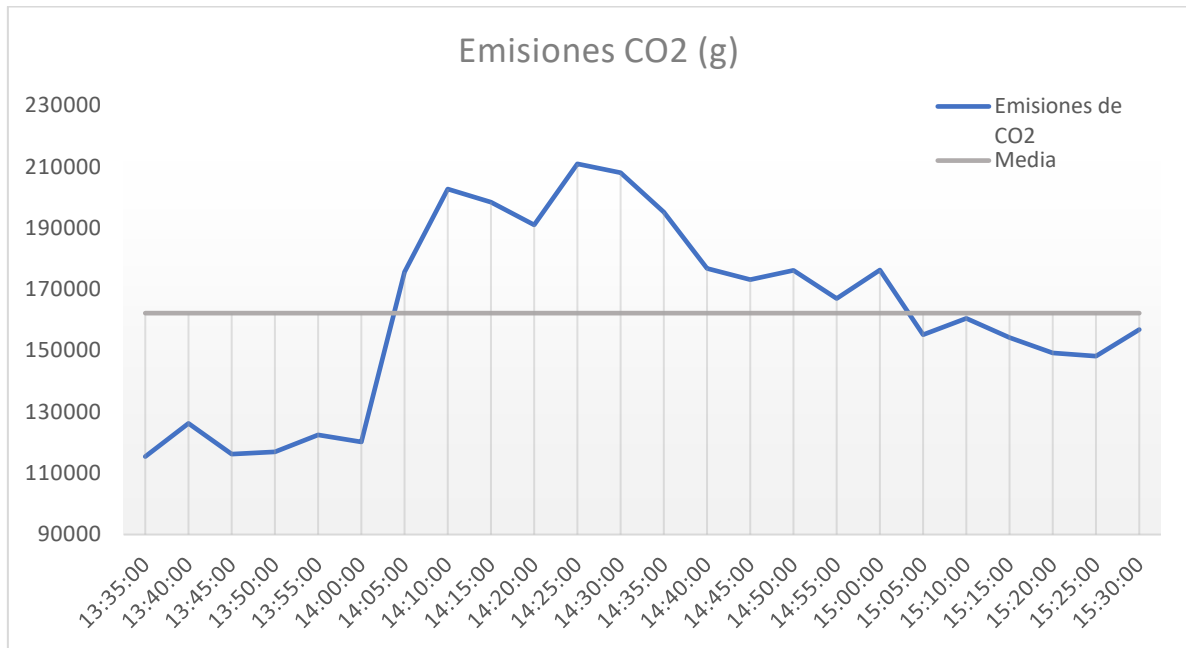


Gráfico 4.5-7 Emisiones CO₂ Modelo 1. Fuente: Elaboración propia

EMISIONES CO ₂ (g)	
Media	162235,95
Máximo	210947,84
Total	3893662,79

Tabla 4.5-12 Datos de emisiones de CO₂ Modelo 1. Fuente: Elaboración propia

Como se puede ver la gráfica de emisiones de CO₂ guarda una clara relación con la de Flujo y Densidad y es que es razonable que en los momentos de flujo de tráfico mayor las emisiones sean mayores. Por eso podemos ver como a las 14:00 la cantidad de emisiones de CO₂ que se producen se dispara y se sitúa muy por encima de la media. A partir de las 14:25 comienza a descender, pero no es hasta las 15:05 cuando las emisiones se sitúan de nuevo en valores razonables. Por lo tanto, durante 1 hora el barrio de La Rondilla soporta una generación de CO₂ elevada.

Otro dato que hay que destacar es la cantidad total de CO₂ que se emite en La Rondilla durante las dos horas de simulación (3.893.662,79 gramos). Casi 4 toneladas de dióxido de carbono se emiten a la atmósfera durante la simulación.

Teniendo en cuenta que tras la simulación el software data en 1.892 litros consumidos en total por todos los vehículos de la red y teniendo en cuenta que un vehículo promedio emite uno 2,2 kg de CO₂ por litro consumido parece razonable obtener casi cuatro toneladas de dióxido de carbono. Sin embargo, esta cantidad puede ser reducida y eso es lo que se tratará de demostrar con los dos modelos con restricciones que se proponen.

2.NO_x

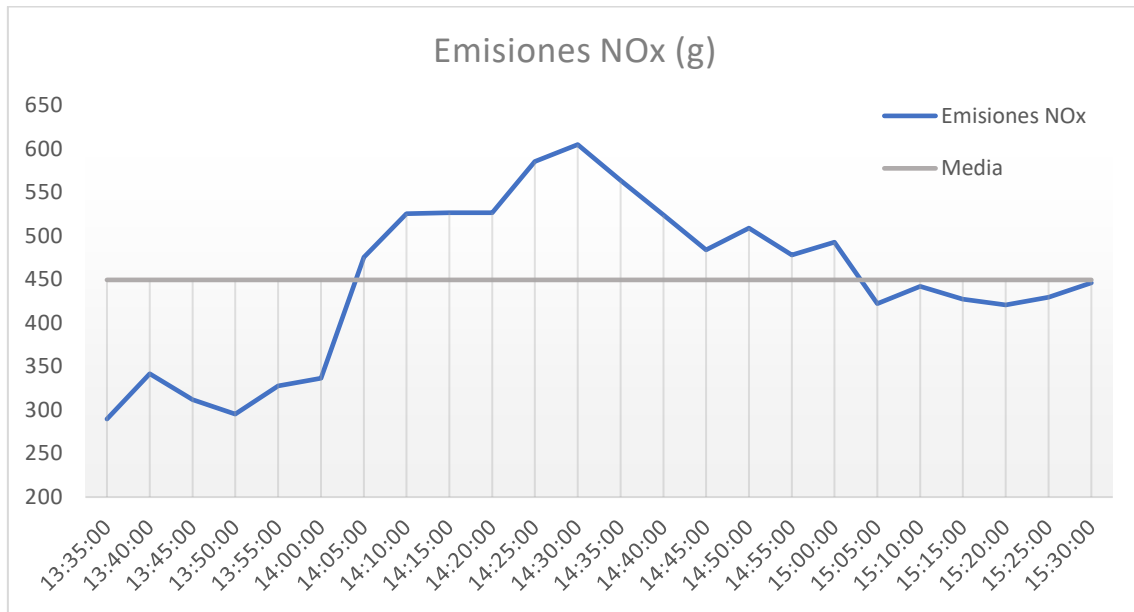


Gráfico 4.5-8 Emisiones NOx Modelo 1. Fuente: Elaboración propia

EMISIONES NOx (g)	
Media	449,55
Máximo	605,06
Total	10789,09

Tabla 4.5-13 Datos emisiones NOx Modelo 1. Fuente: Elaboración propia

En el caso de los óxidos de nitrógeno el comportamiento es similar, experimenta un repunte a las 14:00 y se va reduciendo a partir de las 14:30 momento en el cual alcanza el máximo. La cantidad total de NO_x que se genera es de 10.789,09 gramos que lógicamente es mucho menor que la de CO₂ pero que igualmente puede ser reducida y es conveniente que eso sea así ya que como se veía en capítulos anteriores los óxidos de nitrógeno son muy perjudiciales para la salud y para el medio ambiente.

3.PM

En este caso el modelo de Panis et al (2006), que como ya se había comentado es el que usa Aimsun Next para el cálculo de emisiones, no hace una distinción entre los distintos tipos de partículas en función de su diámetro. Por lo tanto, los datos que se van a mostrar hacen referencia al conjunto de partículas de distintos tamaños emitidas.

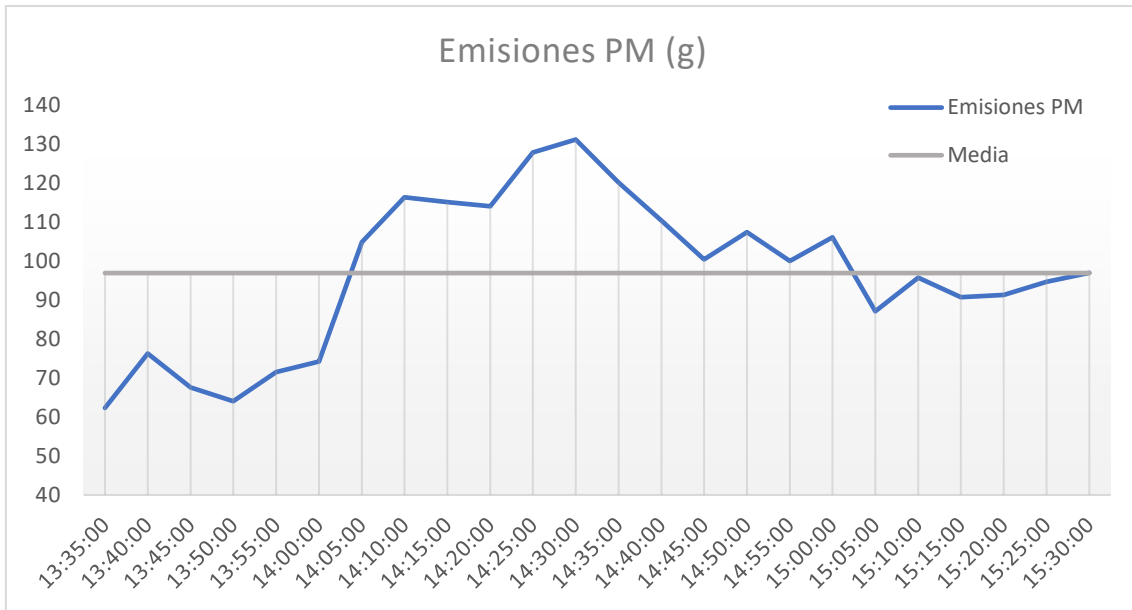


Gráfico 4.5-9 Emisiones PM Modelo 1. Fuente: Elaboración propia

EMISIONES PM (g)	
Media	96,9
Máximo	131,13
Total	2325,5

Tabla 4.5-14 Datos emisiones PM Modelo 1. Fuente: Elaboración propia

En este caso, al igual que con el CO₂ y el NO_x, la emisión de partículas sigue guardando relación con el gráfico de flujo que se ha tomado como referencia. En este caso en las dos horas de simulación se emiten 2.325,5 gramos de partículas que, aunque pueda parecer poco, no lo es ya que como se vio anteriormente las partículas en suspensión afectan gravemente a las vías respiratorias de las personas.

Los datos obtenidos para los tres contaminantes pueden parecer razonables teniendo en cuenta el flujo de vehículos que circulan por La Rondilla durante la simulación. Sin embargo, aunque pueden ser entendibles no dejan de ser elevados, por ello a continuación se proponen dos modelos que implementan restricciones de tráfico que tratan de reducir la cantidad de emisiones emitidas de estos tres contaminantes sin que los parámetros globales que caracterizan el tráfico se vean altamente afectados.

Al igual que se hizo para las características del tráfico a continuación se muestra una tabla con la cantidad de contaminante de cada tipo que se produce en las calles más significativas de La Rondilla a lo largo de las dos horas de estudio. En este caso lo que se ha hecho es sumar el contaminante producido en cada una de las secciones que componen la calle.

CALLES	CO ₂ (g)	NO _x (g)	PM (g)
Rondilla de Santa Teresa Dirección Oeste	525116,45	1559,12	285,67
Rondilla de Santa Teresa Dirección Este	159602,86	463,7	69,53
Tirso de Molina	212821,73	605,42	127,59
Cardenal Torquemada	324157,27	906,28	166,31
Av. Palencia Dirección Sur	268713,48	752,38	157,61
Av. Palencia Dirección Norte	144596,15	404,82	85,26
Cerrada	66384,06	175,5	37,22
Soto	99337,15	285,07	53,62
Paseo del Renacimiento	45039,17	143,37	19,59
Mirabel	196407,11	568,07	97,2

	CO ₂ (g)	NO _x (g)	PM (g)
SUMA CALLES (g)	2042175,4	5863,73	1099,6
TOTAL RED (g)	3893662,8	10789,09	2325,5
PORCENTAJE (%)	52,45	54,35	47,28

Tabla 4.5-15 Emisiones por calles Modelo 1. Fuente: Elaboración propia

Tras el análisis de estas dos tablas se puede concluir que efectivamente las calles que se han estudiado más a fondo son realmente representativas ya que las emisiones que se generan en ellas durante la simulación suponen entre un 47 y un 54% del total de toda la red.

4.5.2 Modelo 2: Limitación a 30 Km/h

Como se vio en el capítulo 3 de teoría sobre emisiones contaminantes, una de las medidas más utilizadas en aquellas situaciones en las que la contaminación del aire está por encima de los valores permitidos es reducir la velocidad máxima permitida a 30 km/h en los núcleos urbanos.

Esta medida es quizá la primera que se toma para tratar de reducir rápidamente esos niveles elevados de contaminación y es una medida poco restrictiva desde el punto de vista de la posibilidad de circulación ya que no excluye del tráfico a ningún vehículo, sino que simplemente reduce su velocidad máxima permitida.

Cabe destacar que el pasado 10 de noviembre de 2020 el Gobierno de España redactó un Real Decreto que limitará a partir del año 2021 la velocidad máxima permitida a 30 Km/h en vías de un único carril para cada sentido. Esta medida se aplicará en toda España, pero ya hay ciudades como Bilbao donde esa velocidad está implantada en todas sus calles. El objetivo, además de reducir emisiones, es aumentar la seguridad del peatón. Por lo tanto, el hecho de que la limitación a 30 km/h se vaya a convertir en una

realidad en un futuro próximo en muchas de las calles de los centros de las ciudades, hace que el análisis de el presente Modelo 2 cobre una mayor importancia e interés.

Lo que se realiza a continuación, es la simulación de la misma red que en el Modelo 1 (mismas características dimensionales y de demanda) pero determinando 30 km/h como velocidad máxima en todas las secciones que componen la red con independencia de su importancia o geometría.

Cabe esperar que esta medida tenga un mayor impacto en aquellas calles donde más contaminación se produce que coinciden con aquellas calles donde los vehículos alcanzan velocidades mayores.

Aimsun ofrece dos opciones que permiten limitar la velocidad:

- Modificar la velocidad máxima de las secciones.
- Modificar la velocidad máxima alcanzable de los vehículos.

Para la simulación que se hace en este modelo lo que se ha hecho es modificar la velocidad máxima de las calles ya que eso permite que los vehículos de la red puedan puntualmente superar ese valor por ejemplo en un adelantamiento, lo que hace que la simulación sea más realista.

A diferencia del procedimiento que se llevó a cabo en la simulación del Modelo 1, en este caso se van a analizar primero las emisiones de la red para comprobar que, como se espera, la medida sea efectiva y después se estudiará el impacto que esta genera en el tráfico a través del análisis de sus parámetros globales más significativos. Al igual que en el Modelo 1 en este caso también se llevará a cabo un estudio de los valores obtenidos en las calles más significativas de La Rondilla.

El objetivo final de la simulación de este modelo es llevar a cabo una comparativa con el Modelo 1 y ver hasta que, punto una reducción de la velocidad lleva asociada una reducción de las emisiones.

4.5.2.1 Estudio de las emisiones

Una vez que todas las secciones han sido modificadas se ejecuta la simulación y se obtiene el mapa de color que se muestra a continuación:

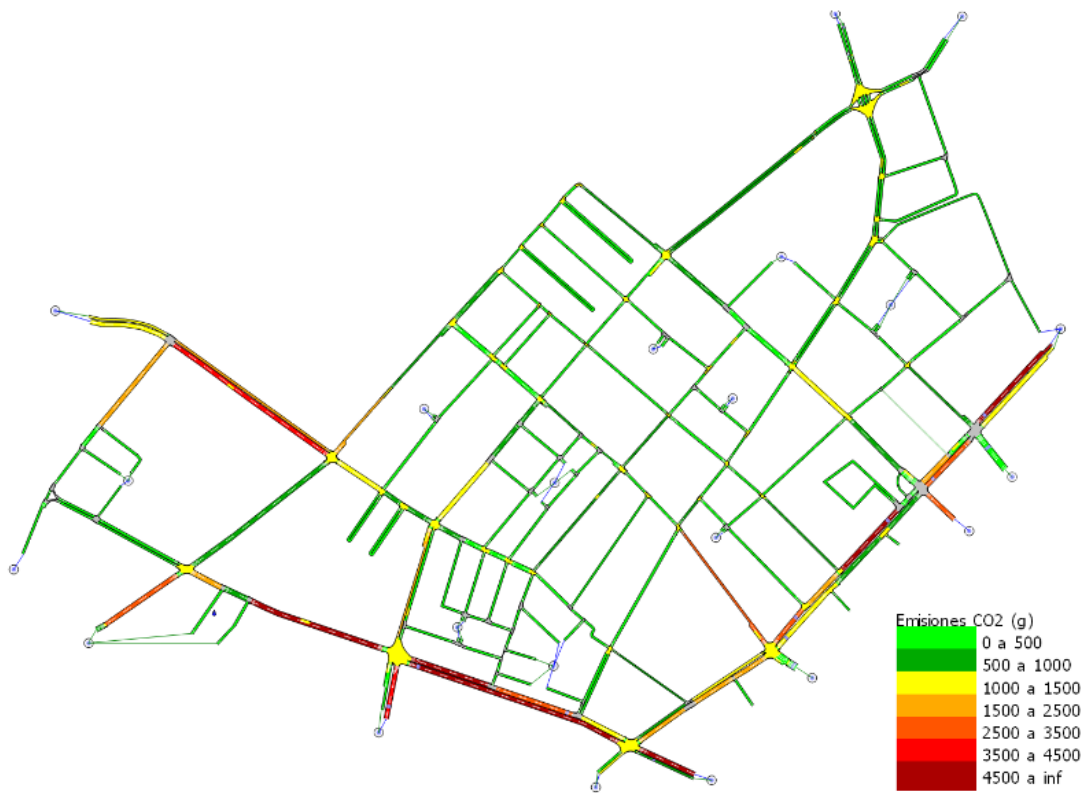


Ilustración 4.5-3 Mapa de color de emisiones de CO₂ en La Rondilla a las 14:15 Modelo 2. Fuente: Aimsun Next

Podemos observar que algunas calles siguen presentando niveles de contaminación elevados, pero sí que hay cambios significativos en comparación con el mapa del Modelo 1:

- La calle Soto ahora aparece casi en su totalidad en verde
- La calle Mirabel ha aumentado el número de secciones en verde
- La calle Cardenal Torquemada ha disminuido la tonalidad en algunos tramos

A continuación, se hará un estudio mucho más detallado de las emisiones emitidas en este modelo. Pero tras un primer análisis del mapa de color a las 14:15 y en comparación con el obtenido en el Modelo 1 sí que se observa una reducción de las emisiones en este modelo.

1.CO₂

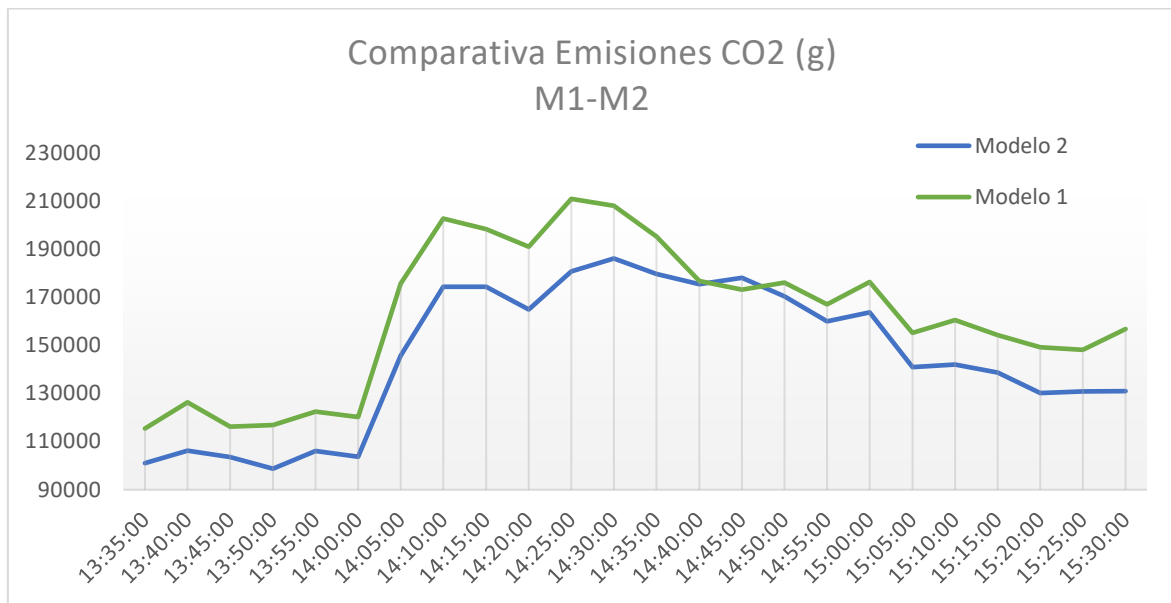


Gráfico 4.5-10 Comparativa emisiones CO₂ Modelo 1 y Modelo 2. Fuente: Elaboración propia

EMISIONES CO ₂ (g) M1-M2			
	Modelo 1	Modelo 2	Reducción
Media	162235,95	145293,507	10,44%
Máximo	210947,84	186159,9	11,75%
Total	3893662,79	3487044,17	10,44%

Tabla 4.5-16 Datos comparativos emisiones CO₂ Modelo 1 y Modelo 2. Fuente: Elaboración propia

Se puede observar cómo al reducir la velocidad máxima permitida a 30 Km/h en todas las calles de La Rondilla, las emisiones de CO₂ caen en un 10,44% lo que supone que en dos horas de simulación se emiten 400.000 gramos menos de CO₂ a la atmósfera.

A priori puede parecer una reducción pequeña, pero hay que tener en cuenta que esta es una medida que se suele mantener durante varios días y que por lo tanto la reducción es acumulativa. Lo que quiere decir que si en varios días se consigue una reducción próxima al 11% se puede alcanzar el objetivo deseado que es que la calidad del aire mejore.

2.NO_x

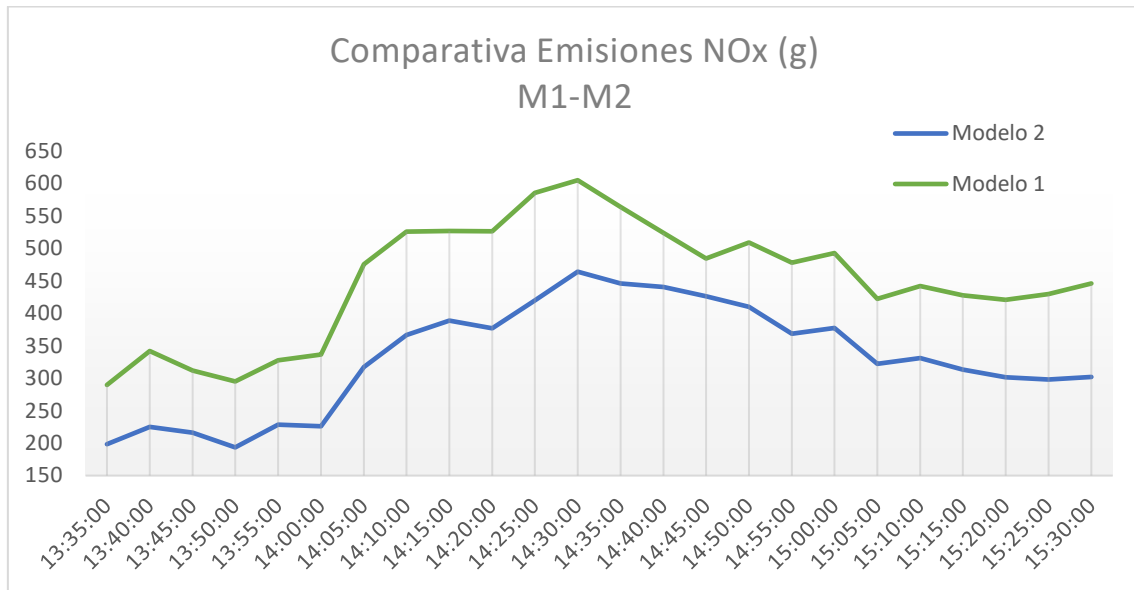


Gráfico 4.5-11 Comparativa emisiones NO_x Modelo 1 y Modelo 2. Fuente: Elaboración propia

EMISIONES NO _x (g) M1-M2			
	Modelo 1	Modelo 2	Reducción
Media	449,55	331,54	26,25%
Máximo	605,06	464,12	23,29%
Total	10789,09	7956,92	26,25%

Tabla 4.5-17 Datos comparativos emisiones NO_x Modelo 1 y Modelo 2. Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar, en el caso de los óxidos de nitrógeno la medida es mucho más efectiva, consiguiéndose una reducción del 26,25 % lo que se traduce en 2832,17 gramos menos de NO_x emitidos a la atmósfera. Además, en el caso de este contaminante en el Modelo 2 siempre se mantiene por debajo del Modelo 1, no como en el caso de el CO₂ que a las 14:45 ambas curvas llegaban a cruzarse.

Como se comentaba en apartados anteriores los NO_x eran tremendamente perjudiciales para la salud de las personas, por lo tanto, desde ese punto de vista la medida que se plantea en el Modelo 2 es realmente efectiva.

3.PM

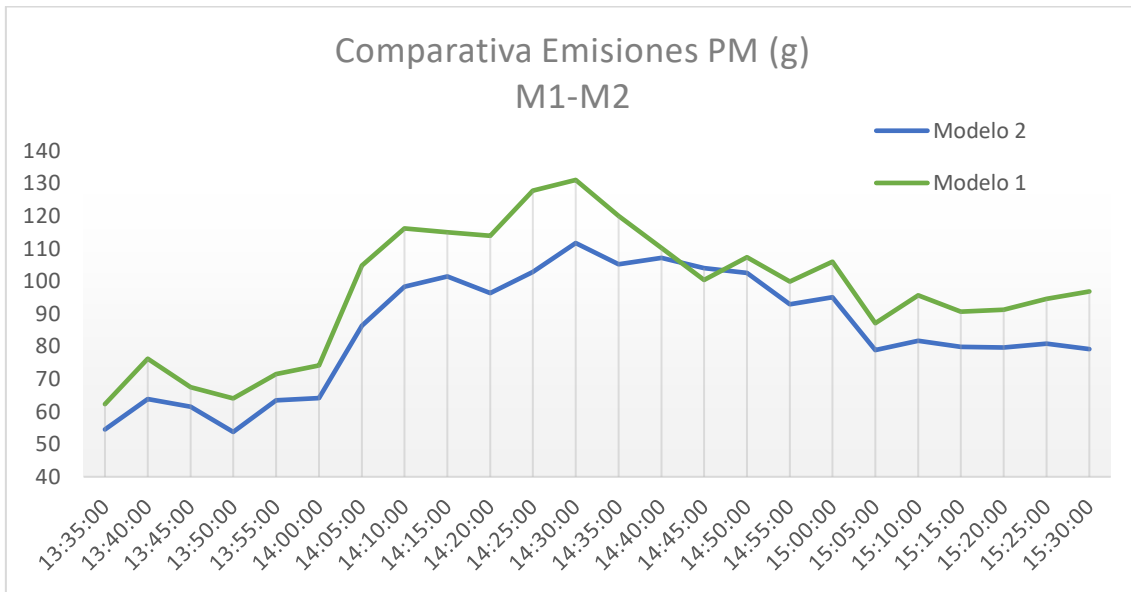


Gráfico 4.5-12 Comparativa emisiones PM Modelo 1 y Modelo 2. Fuente: Elaboración propia

EMISIONES PM (g) M1-M2			
	Modelo 1	Modelo 2	Reducción
Media	96,9	85,26	12,01%
Máximo	131,13	111,76	14,77%
Total	2325,5	2046,21	12,01%

Tabla 4.5-18 Datos comparativos emisiones PM Modelo 1 y Modelo 2. Fuente: Elaboración propia

En el caso de las partículas que como ya vimos Aimsun no distingue entre distintos diámetros, los niveles de reducción que se obtiene son similares a los obtenidos para el CO₂. En este caso se consigue reducir en un 12,01% las emisiones de partículas, lo que se traduce en 279,29 gramos menos. También se aprecia en este caso un comportamiento similar al del CO₂ ya que ambas emisiones experimentan en el modelo 1 una gran caída a las 14:30 que es mucho más leve en el Modelo 2 por lo tanto ese provoca que a las 14:45 lleguen a existir más emisiones en el Modelo 2 que en el Modelo 1, pero rápidamente se vuelven a compensar. Que en el caso del Modelo 2 los aumentos y disminuciones se produzcan de una manera más suave que en el Modelo 1 se puede explicar debido a que al reducir la velocidad máxima permitida los vehículos mantienen una velocidad más constante y por lo tanto se reduce el número de acelerones y de frenadas.

Una vez que han sido analizados los datos globales de emisiones, se procede a hacer un estudio de las mismas para las calles que han sido seleccionadas como más representativas de la red. A continuación, se muestra una tabla comparativa con los datos obtenidos para cada contaminante en cada calle para los Modelos 1 y 2.

TABLA COMPARATIVA EMISIONES POR CALLES				
M1-M2				
CALLE	EMISIÓN	M1 (g)	M2 (g)	Variación (%)
Rondilla de Santa Teresa Dirección Oeste	CO ₂	525116,45	559121,19	6,48
	NO _x	1559,12	1234,33	-20,83
	PM	285,67	307,85	7,76
Rondilla de Santa Teresa Dirección Este	CO ₂	159602,86	164274,86	2,93
	NO _x	463,7	387,12	-16,51
	PM	69,53	68,77	-1,09
Tirso de Molina	CO ₂	212821,73	174653,78	-17,93
	NO _x	605,42	384,32	-36,52
	PM	127,59	104,1	-18,41
Cardenal Torquemada	CO ₂	324157,27	288139,56	-11,11
	NO _x	906,28	719,62	-20,6
	PM	166,31	145,33	-12,61
Av. Palencia Dirección Sur	CO ₂	268713,48	329322,33	22,56
	NO _x	752,38	828,32	10,09
	PM	157,61	184,2	16,87
Av. Palencia Dirección Norte	CO ₂	144596,15	130899,58	-9,47
	NO _x	404,82	291,65	-27,96
	PM	85,26	72,01	-15,54
Cerrada	CO ₂	66384,06	62526,73	-5,81
	NO _x	175,5	144,08	-17,9
	PM	37,22	39,31	5,62
Soto	CO ₂	99337,17	56010,65	-43,62
	NO _x	285,07	129,55	-54,56
	PM	53,62	33,9	-36,78
Paseo del Renacimiento	CO ₂	45039,17	49475,66	9,85
	NO _x	143,37	108,68	-24,2
	PM	19,59	25,74	31,39
Mirabel	CO ₂	196407,11	159946,6	-18,56
	NO _x	568,07	313,25	-44,86
	PM	97,2	84,75	-12,81

Tabla 4.5-19 Tabla comparativa emisiones por calles Modelo 1 y Modelo 2. Fuente: Elaboración propia

Del análisis de los datos obtenidos para estas calles se pueden sacar varias conclusiones. En primer lugar, se confirma tal y como se adelantaba tras el análisis del mapa de color que las calles que más se benefician de esta medida son Cardenal Torquemada, Tirso de Molina, Soto y Mirabel con reducciones de todos los contaminantes en porcentajes muy notables.

En segundo lugar, cabe destacar que, excepto en la Avenida de Palencia Dirección sur en todas las calles se experimenta un descenso del NO_x y que además en comparación con los otros dos contaminantes, los óxidos de nitrógeno son los que más descienden con esta medida. Esto confirma que, tal y como veíamos en el análisis global de las emisiones de la red, el NO_x es el gas que más se reduce con la implantación de la medida de disminución de la velocidad máxima permitida.

En tercer lugar, si bien es cierto que la mayoría de gases experimentan una reducción en las diferentes calles, existen algunos casos como Rondilla de Santa Teresa Dirección Oeste, Avenida de Palencia Dirección Sur y Paseo del Renacimiento donde se pueden observar ligeros aumentos de CO_2 y PM. Esto demuestra que ambos gases guardan relación, como se puede comprobar en los gráficos comparativos del análisis global de la red de ambos gases que además a las 14:45 llegaban a cruzarse lo que se evidenciaba que en momentos puntuales en el Modelo 2 se emitía más cantidad de CO_2 y PM.

Una vez que ya se ha llevado a cabo el análisis de las emisiones en el Modelo 2 y la comparativa entre los resultados obtenidos para el Modelo 1 y 2 se puede concluir que la medida de reducir la velocidad máxima permitida a 30 Km/h resulta efectiva desde el punto de vista de la reducción de emisiones. Quizá los porcentajes de reducción no sean muy elevados, pero cabe destacar que la demanda se ha mantenido igual en ambos modelos por lo tanto para una demanda igual solo reduciendo la velocidad si que se consigue una disminución de las emisiones de gases contaminantes muy notable.

Una vez que se ha demostrado que esta medida es eficaz y se consigue el objetivo que se persigue con ella, a continuación, se va a comprobar a través del análisis de parámetros globales de tráfico de la red como su implantación afecta a la calidad del servicio de la red.

4.5.2.2 Análisis de los parámetros globales del tráfico

Se ha visto como reduciendo la velocidad máxima permitida de 50 a 30 Km/h se consigue una reducción de las emisiones de CO_2 y PM cercana al 20% y de casi el 30% en el caso de los NO_x .

En este modelo la demanda de vehículos no ha sido modificada, es decir, la demanda del Modelo 1 y el Modelo 2 es la misma por lo tanto los vehículos que han circulado por la red también son los mismos.

A continuación, se ve en una tabla comparativa como ha afectado a los parámetros principales que caracterizan el tráfico la implantación de la medida restrictiva del Modelo 2. De especial interés resulta el análisis de la densidad de tráfico (veh/km) y del

tiempo de viaje (s/km) ya que son parámetros que dan una idea clara del nivel de servicio que ofrece la red en ambos modelos.

COMPARATIVA PARÁMETROS DEL TRÁFICO M1-M2			
VARIABLE	MODELO 1	MODELO 2	VARIACIÓN (%)
Densidad (veh/km)	11,05	14,4	30,32
Flujo (veh/h)	6195	6164	-0,5
Velocidad (km/h)	23,42	16,73	-28,57
Tiempo de viaje (s/km)	211,9	275,58	30,05
Tiempo de demora (s/km)	142,86	165,19	15,63
Tiempo de parada (s/km)	120,82	151,16	25,11

Tabla 4.5-20 Comparativa parámetros globales de tráfico Modelo 1 y Modelo 2. Fuente: Elaboración propia

Antes de llevar a cabo el análisis de los datos obtenidos cabe destacar que para cada parámetro se ha utilizado el valor medio de toda la red para llevar a cabo la comparativa de modelos. Como cabía esperar la reducción a 30 km/h de todas las calles de la red supone un aumento de la densidad, la velocidad y los tiempos de viaje, demora y parada.

Es interesante destacar como el aumento de la densidad guarda una estrecha relación con el aumento del tiempo de viaje ya que la densidad de la red afecta directamente a este otro factor. También es importante destacar que, aunque la disminución de la velocidad máxima de 50 a 30 km/h supone una reducción del 40%, la velocidad media de la red solo disminuye un 28,57%.

La tabla que se muestra a continuación, muestra una comparativa entre datos de interés como son la distancia total recorrida por los vehículos de la red y el tiempo total de viaje de ambos modelos.

COMPARATIVA OTROS PARÁMETROS DE INTERÉS M1-M2		
Parámetro	Modelo 1	Modelo 2
Distancia Total Viajada (km)	10584,29	10538,36
Tiempo Total de Viaje (h)	565,39	737,6

Tabla 4.5-21 Comparativa otros parámetros de interés Modelo 1 y Modelo 2. Fuente: Elaboración propia

Por lo tanto, se puede concluir que la medida implantada en el Modelo 2 consigue reducir la cantidad de emisiones de gases contaminantes manteniendo la demanda de vehículos, pero empeorando el nivel de servicio de la misma ya que parámetros importantes como la densidad o el tiempo de viaje aumentan notablemente.

4.5.3 Modelo 3: Restricción del tráfico por matrículas

En ocasiones la sucesión de días en los que los valores de contaminación son muy elevados no es suficiente con tomar medidas como las implantadas en el Modelo 2, sino que, es necesario implantar de manera temporal medidas más drásticas que reduzcan el flujo de vehículos que circulan por las calles con el objetivo de que la cantidad de gases contaminantes emitidos se reduzca rápidamente.

La medida que se va a estudiar en este Modelo 3 consiste en reducir el número de vehículos que pueden circular de manera drástica. Cada día solo podrán circular por las calles de la red los vehículos cuya matrícula sea para o impar. De este modo se pretende reducir la demanda de vehículos a prácticamente la mitad.

Para evitar confusiones de los conductores en relación a que vehículos pueden circular cada día la medida se regirá por el número del día del mes en el que se esté, de este modo en días pares podrán circular vehículos con matrícula par y viceversa.

Para representar en el software el efecto que tendría esta medida en la red con la que se trabaja lo que se ha hecho es reducir en un 40% la demanda de vehículos que van a circular por la red. Cabe destacar que aunque la medida pretende reducir en un 50% el flujo se ha considerado que una reducción del 40% sería mucho más realista ya que una vez implantada la medida habría que considerar varios factores que harían que la demanda no se redujese tan drásticamente como pueden ser personas que ignoren la norma y circulen igualmente, familias que cuenten con varios vehículos y que usen aquel al que le esté permitido el tráfico cada día o vehículos que normalmente no circularían por La Rondilla pero que en estas condiciones lo tengan que hacer para recoger a personas.

A diferencia de la medida planteada en el Modelo 2 donde antes de la simulación se desconocía si las emisiones iban a bajar o no, en este caso es evidente que, al reducir la demanda y por lo tanto el flujo de vehículos, las emisiones van a disminuir. Por lo tanto, en este caso lo que se pretende analizar no es si las emisiones bajan, sino si la reducción de emisiones que se va a producir es la esperada y si merece la pena implantar esta medida teniendo en cuenta los trastornos que ocasiona a los usuarios.

El software Aimsun Next con el que se trabaja permite llevar a cabo operaciones con las matrices O/D que modifiquen los valores que se encuentran en cada celda. En este caso lo que se ha hecho es multiplicar los valores de las celdas por 0,6 lo que supone la reducción del 40% que se comentaba anteriormente.

4.5.3.1 Estudio de las emisiones

Una vez que la medida se ha implantado en el software y se han llevado a cabo las modificaciones necesarias en la red, se ejecuta la simulación. A continuación, se muestra un mapa de color que representa las emisiones de CO₂ producidas a las 14:15 que como se ha comentado en los Modelos 1 y 2 es la más representativa de la hora punta.

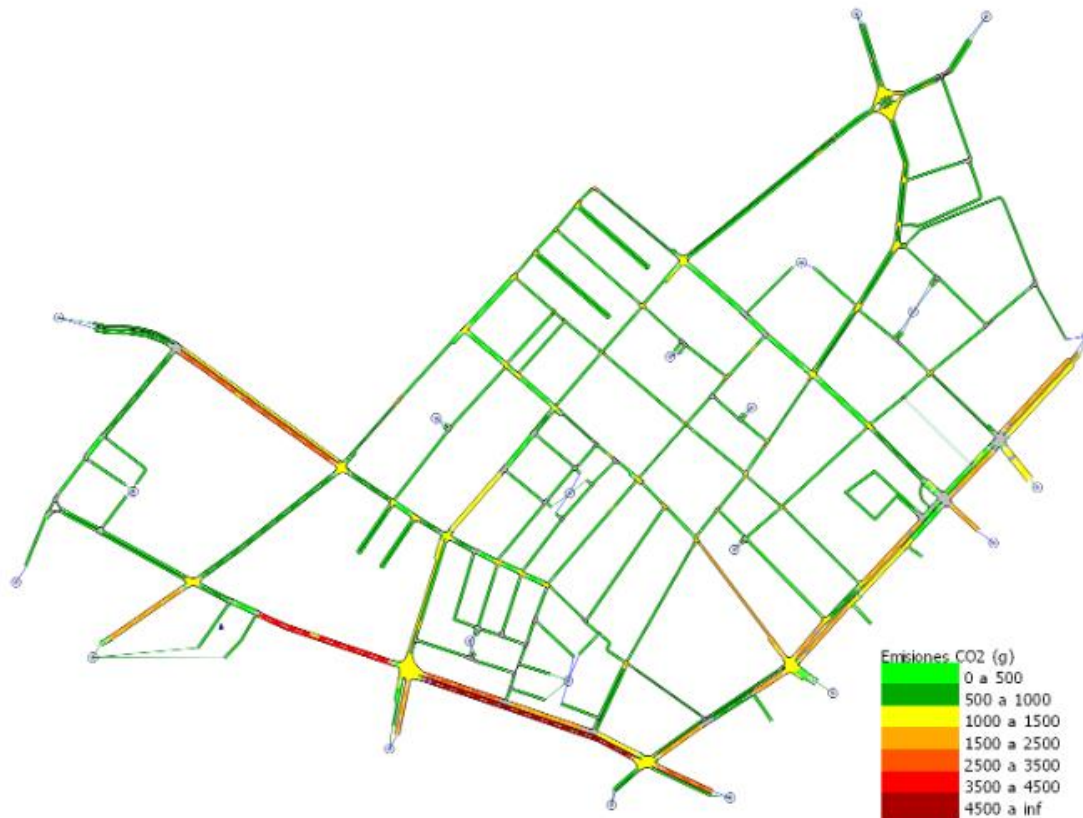


Ilustración 4.5-4 Mapa de color de emisiones de CO₂ en La Rondilla a las 14:15 Modelo 3. Fuente: Elaboración propia

A simple vista se puede observar como, en comparación con el mapa del Modelo 1, la tonalidad es mucho más clara en este caso. Algunas de las calles que más favorecidas se ven con la implantación de esta medida son:

- Calle Mirabel: Enteramente en verde
- Calle Cardenal Torquemada: Prácticamente verde en su totalidad
- Calle Soto: Enteramente en verde
- Paseo del Renacimiento: Enteramente en verde
- Av. de Palencia: Se aprecia claramente una reducción de la intensidad del color

Por lo tanto, tras el análisis del mapa de color si que se puede prever una gran reducción de las emisiones. A continuación, se llevará a cabo el análisis detallado de cada uno de los gases contaminantes.

-CO₂

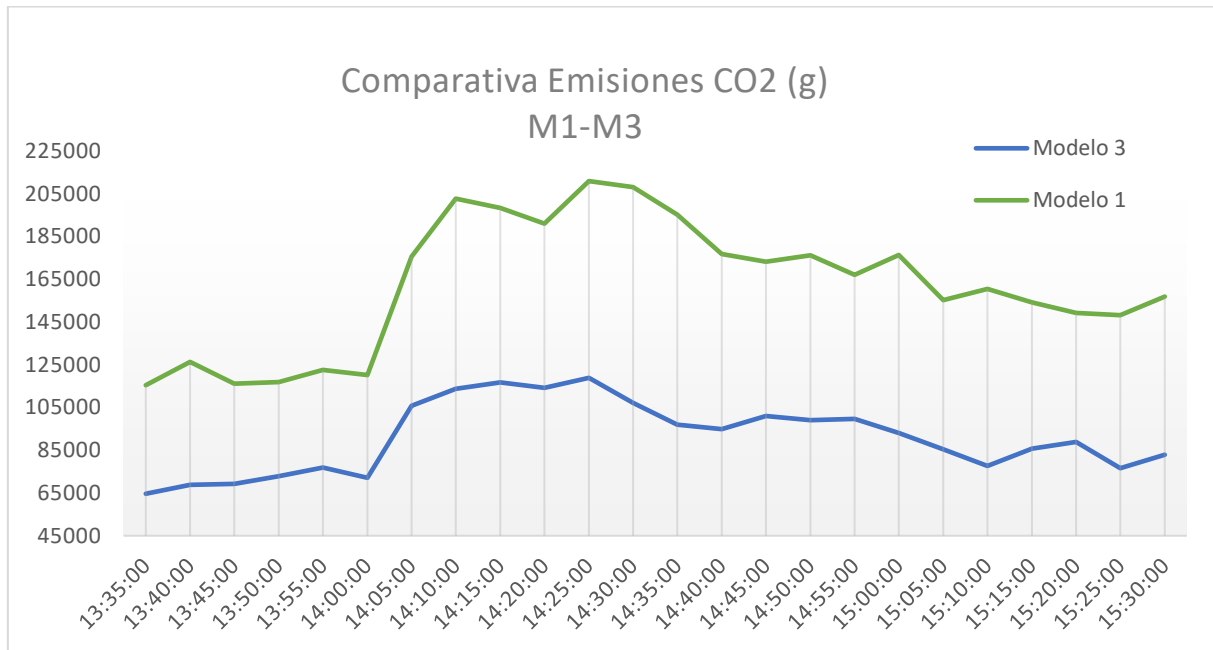


Gráfico 4.5-13 Comparativa emisiones CO₂ Modelo 1 y Modelo 3. Fuente: Elaboración propia

EMISIONES CO ₂ (g) M1-M3			
	Modelo 1	Modelo 3	Reducción
Media	162235,95	90961,38	43,93%
Máximo	210947,84	118890,44	43,64%
Total	3893662,79	2183073,1	43,93%

Tabla 4.5-22 Comparativa datos emisiones CO₂ Modelo 1 y Modelo 3. Fuente: Elaboración propia

Se observa como la reducción de las emisiones de CO₂ es muy significativa. Cabe destacar que con una reducción del tráfico de un 40% se consigue una reducción de las emisiones de CO₂ del 43,93% lo que demuestra que, como se esperaba, ambos factores guardan una estrecha relación.

Otro aspecto importante a destacar es que, aunque las curvas del Modelo 1 y del Modelo 3 se comportan de manera similar, en el caso del Modelo 3 la curva permanece mucho más estable y aunque si experimenta una subida en las horas punta no es tan pronunciada como en el caso del Modelo 1. Esto se debe a que como la densidad de tráfico descende ya que tenemos el mismo espacio, pero menos vehículos, estos pueden circular a velocidades más constantes sin necesidad de acelerar y frenar frecuentemente.

-NO_x

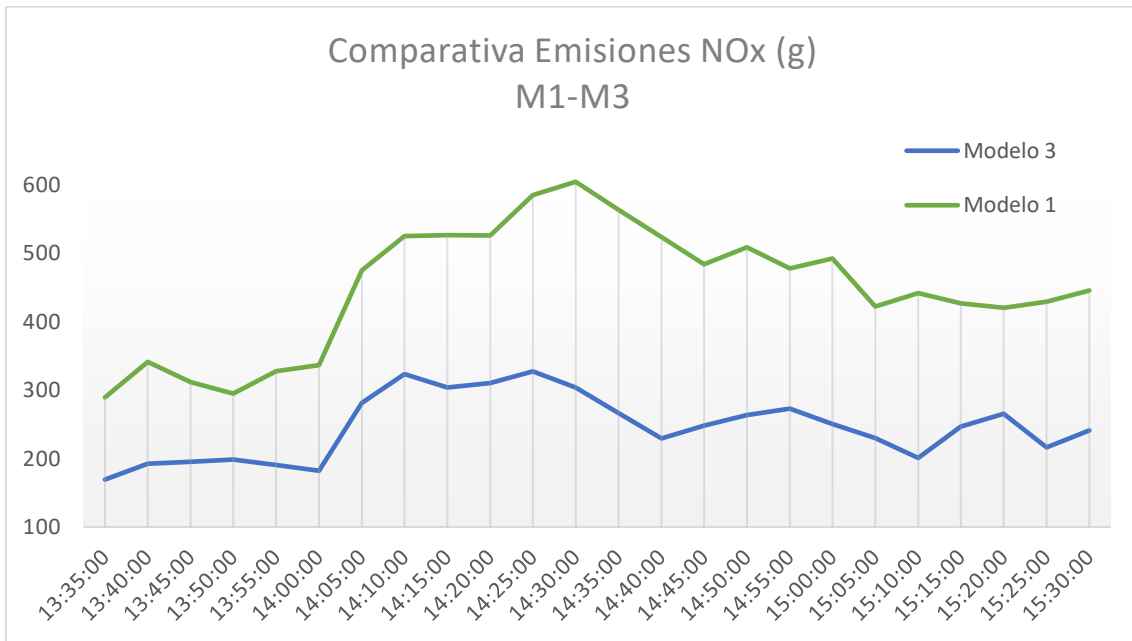


Gráfico 4.5-14 Comparativa emisiones NO_x Modelo 1 y Modelo 3. Fuente: Elaboración propia

EMISIONES NO _x (g) M1-M3			
	Modelo 1	Modelo 3	Reducción
Media	449,55	246,49	45,17%
Máximo	605,06	327,73	45,84%
Total	10789,09	5915,73	45,17%

Tabla 4.5-23 Comparativa datos emisiones NO_x Modelo 1 y Modelo 3. Fuente: Elaboración propia

En el caso del NO_x sucede algo parecido a lo que ocurría con el CO₂. Se consigue una reducción de emisiones de este gas del 45,17% que es bastante positivo teniendo en cuenta que el tráfico se reduce en un 40%. En este caso también cabe destacar que el pico que se alcanzan a las 14:10 no es tan pronunciado como el que se obtenía en el Modelo 1 debido al descenso que se produce en la densidad de tráfico y por lo tanto la posibilidad de alcanzar velocidades más constantes.

-PM

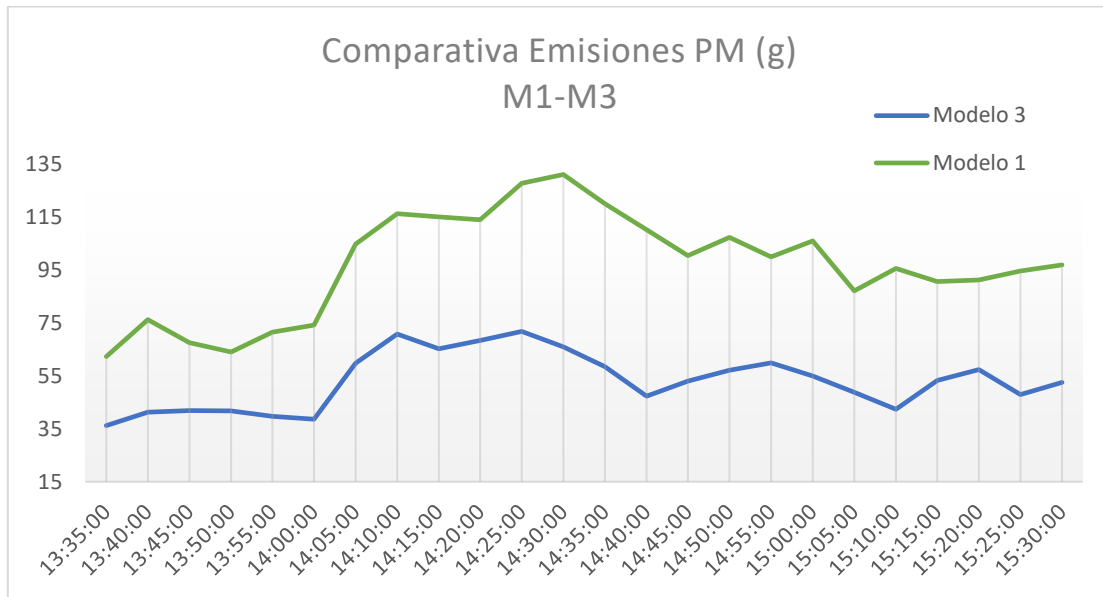


Gráfico 4.5-15 Comparativa emisiones PM Modelo 1 y Modelo 3. Fuente: Elaboración propia

EMISIONES PM (g) M1-M3			
	Modelo 1	Modelo 3	Reducción
Media	96,9	53,1	45,20%
Máximo	131,13	71,82	45,23%
Total	2325,5	1274,49	45,20%

Tabla 4.5-24 Comparativa datos emisiones PM Modelo 1 y Modelo 3. Fuente: Elaboración propia

Como puede observarse la medida implantada en el Modelo 3 tiene su mayor repercusión en las emisiones de partículas PM. En este caso se consigue reducir las en un 45,20% lo que supone una reducción bastante considerable. En este caso a las 14:10 se experimenta una subida más pronunciada que para los otros dos gases.

En comparación con el gráfico obtenido para el CO₂ y los NO_x, las partículas se comportan de una forma menos constante durante la simulación y experimentan más subidas y bajadas.

Una vez que se han analizado el efecto que la implantación de la medida restrictiva ejerce sobre las emisiones globales de La Rondilla durante las dos horas de simulación, se puede concluir que resulta ser una medida efectiva ya que reduciendo en un 40% el tráfico se consiguen reducciones de los gases ligeramente superiores a ese porcentaje.

Sin embargo, hay que tener en cuenta que es una medida que puede causar trastornos en la vida cotidiana de los vecinos ya que en hogares donde solo exista un vehículo esta medida puede suponer un gran inconveniente si, por ejemplo, necesitan el coche para ir al trabajo. Es por ello que se trata de una medida con un claro carácter temporal ya que consigue reducir notablemente las emisiones, pero perjudica a los vecinos limitando su posibilidad de movimiento. Es por ello, que una vez se consiga estabilizar los valores

de calidad del aire, se retorne a funcionamiento como los planteados en el Modelo 1 o el Modelo 2.

A continuación, se realiza un análisis del efecto de la medida implanta en el Modelo 3 sobre las calles más representativas de La Rondilla como ya se hizo en los modelos anteriores.

TABLA COMPARATIVA EMISIONES POR CALLES				
M1-M3				
CALLE	EMISION	M1 (g)	M3 (g)	Reducción (%)
Rondilla de Santa Teresa Dirección Oeste	CO ₂	525116,45	310714,02	40,83
	NO _x	1559,12	840,29	46,1
	PM	285,67	134,32	52,98
Rondilla de Santa Teresa Dirección Este	CO ₂	159602,86	77065,94	51,71
	NO _x	463,7	226,22	51,21
	PM	69,53	37,07	46,68
Tirso de Molina	CO ₂	212821,73	124242,19	41,62
	NO _x	605,42	336,4	44,44
	PM	127,59	65,8	48,43
Cardenal Torquemada	CO ₂	324157,27	142399,88	56,07
	NO _x	906,28	378,76	58,21
	PM	166,31	77,29	53,53
Av. Palencia Dirección Sur	CO ₂	268713,48	146924,06	45,32
	NO _x	752,38	396,3	47,33
	PM	157,61	77,5	50,83
Av. Palencia Dirección Norte	CO ₂	144596,15	89309,63	38,24
	NO _x	404,82	244,34	39,64
	PM	85,26	49,23	42,26
Cerrada	CO ₂	66384,06	33038,96	50,23
	NO _x	175,5	80,62	54,06
	PM	37,22	15,08	59,48
Soto	CO ₂	99337,15	60512,93	39,08
	NO _x	285,07	171,94	39,68
	PM	53,62	32,01	40,3
Paseo del Renacimiento	CO ₂	45039,17	27519,78	38,9
	NO _x	143,37	78,74	45,08
	PM	19,59	9,33	52,37
Mirabel	CO ₂	196407,11	114909,76	41,49
	NO _x	568,07	330,96	41,74
	PM	97,2	55,05	43,36

Tabla 4.5-25 Comparativa emisiones por calles Modelo 1 y Modelo 3. Fuente: Elaboración propia

Como era de esperar todas las calles experimentan reducciones muy significativas de las emisiones. Todas ellas tienen como mínimo una reducción del 38% llegando, en algunos casos, a reducciones por encima del 59% que, si se tiene en cuenta que la demanda se redujo en un 40%, es un resultado muy favorable.

Al igual que en el caso del Modelo 2, algunas calles se ven más favorecidas por esta medida que otras. En concreto las calles que, como se avanzaba tras el análisis del mapa de color, experimentan mayor reducción de emisiones son: Rondilla de Santa Teresa en dirección Este, Cerrada, Mirabel y Cardenal Torquemada, siendo esta última la que más se beneficia de la medida impuesta.

Si bien es cierto que la implantación de la medida provoca reducciones muy significativas de la cantidad de gases contaminantes emitidos no se debe olvidar que es una medida muy restrictiva y que puede causar grandes perjuicios en la vida cotidiana de las personas ya que limita su libertad de poder utilizar los vehículos del hogar en el momento que se desee, por lo tanto, es una medida que siempre se implantará de manera temporal y que no se pretende que se prolongue en el tiempo. Sin embargo, si las familias son capaces de adaptarse a dicha restricción se verán favorecidas por un aire más limpio en su barrio y condiciones de tráfico más favorables.

4.5.3.2 Análisis parámetros globales del tráfico

Al igual que se hizo con el Modelo 2, en este modelo también se va a realizar un análisis de los valores de los parámetros del tráfico que resultan de ejecutar la simulación con la medida del Modelo 3 implantada y se compararán con los obtenidos en el Modelo 1.

A diferencia del modelo 2 en este caso la demanda si ha sido modificada, por lo tanto, el número de vehículos que circulan por la red a lo largo de las dos horas que abarca la simulación va a ser menor. Hay que recordar que en concreto la demanda ha sido reducida en un 40%. Por lo tanto, con dicha reducción de demanda los valores que se obtienen para los parámetros del tráfico en el Modelo 3 son los que se resumen en la siguiente tabla:

COMPARATIVA PARÁMETROS DEL TRÁFICO M1-M3			
VARIABLE	MODELO 1	MODELO 3	VARIACIÓN (%)
Densidad (veh/km)	11,05	5,27	-52,31
Flujo (veh/h)	6195	3788,5	-38,85
Velocidad (km/h)	23,42	26,52	13,24
Tiempo de viaje (s/km)	211,9	164,32	-22,45
Tiempo de demora (s/km)	142,86	95,16	-33,39
Tiempo de parada (s/km)	120,82	78,19	-35,28

Tabla 4.5-26 Comparativa parámetros globales de tráfico Modelo 1 y Modelo 3. Fuente: Elaboración propia

Como cabía esperar al haber menos vehículos circulando en el mismo espacio la densidad de tráfico disminuye. Sin embargo, cabe destacar que experimenta un 52,31% de reducción en comparación con el Modelo 1 y la demanda solo se ha reducido en un 40% por lo tanto la fluidez de la circulación será mucho mayor.

Otros parámetros como los tiempos de viaje, de demora y de parada también disminuyen, pero no tanto como cabría esperar. La velocidad media es el único factor que aumenta ya que mantiene una relación inversamente proporcional con la densidad.

Se puede concluir que, mediante la implantación de restricciones de tráfico en función del número de matrícula (par/impar) y el número del día de la semana, además de conseguirse reducciones de gases muy significativas las condiciones de circulación y el nivel de servicio de la red también se ven favorecidos ya que parámetros como la densidad, tiempos de viaje y de demora experimentan reducciones y la velocidad media aumenta por lo tanto la fluidez del tráfico aumenta en términos generales.

Finalmente se muestra una tabla comparativa entre el Modelo 1 y el Modelo 3 que muestra los valores obtenidos para la distancia total viajada y el tiempo total de viaje.

COMPARATIVA OTROS PARÁMETROS DE INTERÉS M1-M3		
Parámetro	Modelo 1	Modelo 3
Distancia Total Viajada (km)	10584,29	6441,46
Tiempo Total de Viaje (h)	565,39	271,79

Tabla 4.5-27 Comparativa otros datos de interés Modelo 1 y Modelo 3. Fuente: Elaboración propia

Como es lógico ambos valores son menores en el Modelo 3 ya que el número de vehículos que circulan por la red también es menor que en el Modelo 1.





CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

5.1 Conclusiones del trabajo

A lo largo de la realización de este trabajo se ha visto como el transporte y el tráfico está presente en nuestras vidas y nos afecta de manera directa. También se ha podido comprobar como actualmente en la sociedad existe una tendencia que trata de limitar el tráfico con el principal objetivo de minimizar el impacto que las emisiones contaminantes que produce tienen sobre las personas y sobre el medio ambiente.

Gracias a este trabajo se ha podido demostrar la importancia que tiene cuidar el Medio Ambiente ya que el fortalecimiento y cuidado del mismo se traduce en una mayor calidad de vida de las personas y de la fauna de nuestro planeta. Se ha podido demostrar como cada año el impacto negativo que el tráfico tiene sobre el Medio Ambiente aumenta y se puede ver traducido en fenómenos ambientales como el aumento del nivel del mar o de las temperaturas medias del planeta. La búsqueda de soluciones a este tipo de problemas ha sido siempre un objetivo en mente a lo largo de la realización del trabajo.

Una vez introducidos los aspectos más teóricos de este trabajo, que han permitido describir un contexto en el que desarrollar el resto de la investigación, el trabajo se ha centrado en la descripción, creación y análisis de resultados de tres modelos diferentes que implementan medidas reales y actuales que tienen como principal objetivo la reducción de las emisiones producidas.

Otra de las conclusiones que se ha podido obtener tras la finalización de la parte práctica, es que Valladolid es una ciudad con un tráfico muy dinámico ya que permite la circulación en un gran número de calles de su área metropolitana. Así mismo, se ha podido comprobar como La Rondilla es un barrio con un tráfico muy intenso, con un volumen y densidad de tráfico elevados que hacen necesaria la búsqueda de alternativas que descongestionen sus calles de vehículos. La contaminación que se produce en algunas de sus calles más importantes es demasiado elevada y por lo tanto el trabajo se ha centrado en la búsqueda de alternativas que reduzcan de una manera rápida esa contaminación.

Con la simulación del Modelo 2 se ha podido comprobar como una medida muy poco restrictiva como es mantener la demanda de vehículos, pero limitar a 30 km/h la velocidad máxima permitida consigue reducir las emisiones en porcentajes de alrededor del 12%. Si se tiene en cuenta que el número de vehículos que circulan es el mismo resulta una medida muy eficaz ya que no restringe el tráfico y reduce las emisiones. Sin embargo, esta medida sólo sería eficaz si se cumple de una manera rigurosa y todos los vehículos circulan como máximo a 30 Km/h, por lo que su implantación implicaría un riguroso control.

Para ocasiones en las que los niveles de contaminación sean muy elevados se ha propuesto una solución que es la que se implementa en el Modelo 3. Esta medida mucho más restrictiva ha resultado ser muy eficaz ya que reduciendo en un 40% los vehículos a

los cuales se les permite la circulación, las emisiones se reducen hasta un 50%. El carácter de esta medida es temporal ya que lo que se pretende con ella es reducir de una manera drástica los niveles de contaminación y, desde ese punto de vista, la medida es efectiva. El gran inconveniente es la necesidad de adaptación por parte de los vecinos afectados ya que no podrán disponer de sus vehículos con total libertad.

Todas estas conclusiones han sido posibles gracias a Aimsun Next que se ha demostrado que es una herramienta de simulación eficaz que permite la creación y simulación de diferentes escenarios ofreciendo resultados fiables. La elaboración del manual de utilización del programa ha sido también enriquecedor ya que ha permitido poder aprender desde 0 la utilización de un nuevo programa con las complicaciones que eso conlleva y llegando a poder producir un documento muy completo con fines didácticos.

Como conclusión final, cabe destacar que el tráfico es un ente cambiante y que la sociedad se ha de adaptar a los cambios que se produzcan en los próximos años ya que la circulación por las ciudades será cada vez más restrictiva y se tendrán que buscar alternativas de movilidad que permitan a las personas moverse de una manera cómoda y eficiente.

5.2 Líneas futuras de investigación

Se considera que el tema tratado en el presente trabajo es suficientemente importante, interesante y actual como para proponer posibles futuras líneas de investigación que ahonden en los problemas derivados del tráfico y que se detallan a continuación:

- Creación de otras redes (barrios) de la ciudad de Valladolid que pudieran complementar la que actualmente está creada y que se ha utilizado en el presente trabajo (La Rondilla).
- Es evidente que en La Rondilla existe un problema con el estacionamiento de vehículos derivado de la alta densidad de población que tiene. Se propone por tanto la búsqueda y análisis de distintas soluciones y alternativas para minimizar o acabar con ese problema.
- Implementación de otras medidas que buscan la reducción de gases contaminantes como la creación de calles peatonales o áreas de uso exclusivo de residentes.
- Crear redes que implementen aceras y demandas de peatones para llevar a cabo simulaciones en las que interactúen el tráfico rodado y el peatonal.
- Profundizar en el ámbito de los vehículos eléctricos e híbridos incluyéndolos en las simulaciones.
- Analizar el impacto que haya causado sobre el tráfico y las emisiones la implantación del programa VA-10 y la creación de carriles propios para bus y taxi en calles como López Gómez, Isabel la Católica o el Puente de Poniente.





CAPÍTULO 6 BIBLIOGRAFÍA

MANUALES

-Aimsun 6.1 New Features. TSS. Transport Simulation Systems, S.L. Barcelona:

Aimsun Macroscopic Modelling Manual v6_1. TSS. Transport Simulation Systems, S.L. Barcelona.

Aimsun MicroMeso Users Manual v6_1. TSS. Transport Simulation Systems, S.L. Barcelona.

Aimsun Users Manual v6_1. TSS. Transport Simulation Systems, S.L. Barcelona.

Aimsun's Adaptive control interfaces Manual v6_1. TSS. Transport Simulation Systems, S.L. Barcelona.

Aimsun's Planning software interfaces Manual v6_1. TSS. Transport Simulation Systems, S.L. Barcelona.

Aimsun's Signal optimisation interfaces Manual v6_1. TSS. Transport Simulation Systems, S.L. Barcelona.

LIBROS

-Dómine Rueda, Carlos. “Simulación del tráfico en circuitos urbanos para analizar el efecto de diferentes estilos de conducción”. Madrid (2015).

-M. Soria. “Evolución de la reglamentación europea sobre emisiones y homologación de los vehículos índice”. Páginas 1-26 (2017)

-Mateu et al. “Introducción a la ingeniería de transporte: teoría y práctica”. (2010)

-Moreno, Borja. “Planificación del tráfico y su influencia en las ciudades”. Octubre (2016)

-Morlok et al. “Introduction to transportation engineering and planning”. (1878)

-Panis et al. “Modelling instantaneous traffic emission and the influence of traffic speed limits”. (2006).

-Plan integral de movilidad urbana ciudad de Valladolid. Informe sobre movilidad.
(2003)

-Rama Labrador, Francisco. “Estudio y accesibilidad urbanística y legislación vigente”.
(2011).

PROYECTOS FIN DE CARRERA

-Araujo Valle, María del Carmen. “Estudio del efecto de los ciclocarriles en la interacción entre flujos de movilidad en un área urbana”. (2019)

-Fernández Miguel, Juan. “Análisis y simulación del tráfico rodado del barrio de La Rondilla”. (2015)

-Gutiérrez Martínez, Santiago. “Sistemas de información a usuarios en carretera para mejorar el accesional parque de la naturaleza de Cabárceno”. (2017)

PÁGINAS WEB

-Asociación vecinal La Rondilla. Última consulta: 10 de julio de 2020

<https://rondilla.org>

-Ingeniería del transporte. Última consulta: 22 de octubre de 2020

<http://ingenierodetransportes.blogspot.com/2016/08/clasificacion-de-vias-locales.html>

-El País. Última consulta: 27 de octubre de 2020

https://elpais.com/sociedad/2019/03/12/actualidad/1552394039_304954.html

https://elpais.com/ccaa/2018/10/05/madrid/1538740369_493583.html

https://elpais.com/sociedad/2019/03/31/actualidad/1554036405_982184.html

-ABC. Última consulta: 30 de octubre de 2020

https://www.abc.es/sociedad/abci-contaminacion-aire-causa-10000-muertes-espana-201906051315_noticia.html?ref=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F

https://www.abc.es/motor/reportajes/abci-y-emiten-coches-combustion-201811131413_noticia.html

-El Mundo. Última consulta: 30 de octubre de 2020

<https://www.elmundo.es/motor/2019/01/02/5c2cafa021efa0db7a8b46b2.html>

-National Geographic. Última consulta: 25 de septiembre de 2020

<https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/lluvia-acida>

<https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/efectos-del-calentamiento-global>

-Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico. Última consulta: 5 de noviembre de 2020

<https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/calidad-del-aire/visor/default.aspx>

-Parlamento europeo. Última consulta: 12 de septiembre de 2020

<https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/society/20190313STO31218/emisiones-de-co2-de-los-coches-hechos-y-cifras-infografia>

-Ayuntamiento de Madrid. Última consulta: 20 de septiembre de 2020

<https://www.madrid.es/portales/munimadrid/es/Inicio/Movilidad-y-transportes/Madrid-Central-Zona-de-Bajas-Emisiones/Informacion-general/Madrid-Central-Informacion-General/?vgnnextfmt=default&vgnnextoid=a67cda4581f64610VgnVCM2000001f4a900aRCRD&vgnnextchannel=088e96d2742f6610VgnVCM1000001d4a900aRCRD>

-Ayuntamiento de Valladolid. Última consulta: 10 de noviembre de 2020

<https://www.valladolid.es/es/actualidad/noticias/ayuntamiento-restringe-circulacion-facilita-gratuidad-7-apa>

<https://www.valladolid.es/es/ciudad/estadisticas>

-Generalidad de Cataluña. Última consulta: 25 de septiembre de 2020

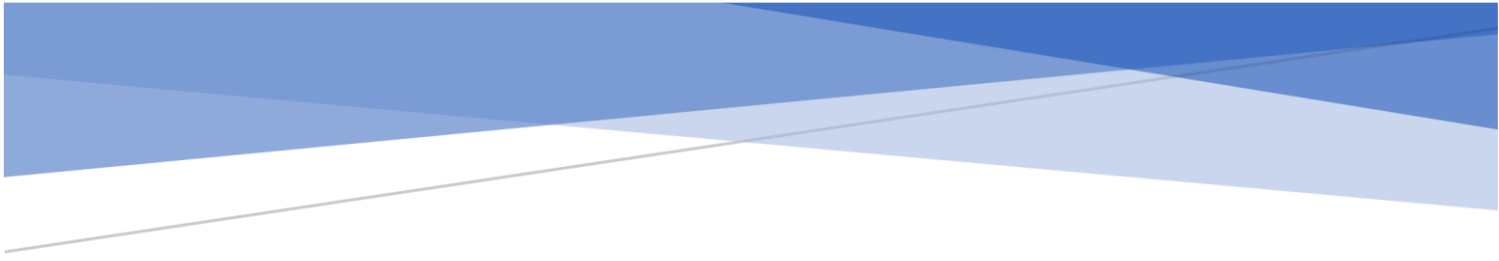
http://mediambient.gencat.cat/es/05_ambits_dactuacio/atmosfera/qualitat_de_laire/qualitat-de-laire-a-la-conurbacio-de-barcelona/pla_millora_qua_aire_2011_2015/mesures-del-pamqa/episodis_ambientals/faqs/restriccions/index.html

-PIMUSSVA. Última consulta: 29 de octubre de 2020

http://www.pimussva.es/wp-content/uploads/2016/05/PIMUSSVA_Analisis_de_la_Movilidad.pdf

-Dirección General de Tráfico. Última consulta: 11 de noviembre de 2020

<http://www.dgt.es>



ANEXO 1 GUÍA DE USO DE AIMSUN

A1.1 Introducción al software

Para el estudio y la elaboración de este proyecto se ha utilizado el programa de software Aimsun Next, en concreto su versión más reciente (Aimsun Next 8.4.2)

Aimsun Next es un programa que permite modelar y simular el comportamiento de redes de transporte de gran tamaño. Una de sus mayores ventajas es que se adapta a las necesidades del usuario, es decir, con Aimsun podemos modelar redes de cualquier tamaño y con la intensidad de tráfico que deseemos.

Actualmente en un mundo en el que la sostenibilidad del tráfico se ha convertido en una necesidad, profesionales de más de 85 países en el mundo utilizan Aimsun Next como soporte para la toma de importantes decisiones que afectan a la movilidad de nuestras ciudades.

Entre las múltiples funcionalidades que nos ofrece este programa, algunas de las más utilizadas son:

- Estudios de viabilidad para carriles para vehículos de alta ocupación (VAO).
- Tasas y peajes en carretera.
- Evaluación de diferentes estrategias de gestión de la demanda.
- Análisis de la seguridad vial.
- Estudio de las emisiones y el impacto ambiental.

En el presente proyecto esta última herramienta será la más utilizada puesto que el objetivo de el mismo es el estudio de las emisiones contaminantes en el barrio de La Rondilla de Valladolid.

Cabe destacar que Aimsun es el único software en el mercado que permite realizar tres tipos de simulaciones: Macroscópica, microscópica y mesoscópica. A esto habría que sumarle la posibilidad de llevar a cabo una simulación híbrida mesoscópica-microscópica.

Por último, es importante considerar por que Aimsun Next es el software elegido por la gran mayoría de los Ingenieros de tráfico. Entre sus aspectos más destacables encontramos:

- Modelado, simulación y análisis en un solo entorno
- Interfaz altamente intuitiva
- Outputs gráficos fáciles de visualizar, interpretar y manipular
- Barra de búsqueda para los diferentes objetos del programa
- Comparación de diferentes modelos.

A1.2 Tipos de simulación con Aimsun Next

-Simulación Macroscópica: Es el análisis de mayor escala que se puede realizar en cuanto al tráfico y se encarga de estudiar el comportamiento de los vehículos a gran escala teniendo en cuenta las condiciones de tráfico que se programen.

-Simulación Mesoscópica: Este tipo de análisis equivaldría a un análisis intermedio entre el macroscópico y microscópico. En este caso, el estudio se puede realizar formando grupos de vehículos o de manera individual. En el análisis mesoscópico aspectos como la aceleración o desaceleración del vehículo no se tienen en cuenta ya que solo se miden los tiempos de entrada y salida de cada una de las diferentes secciones.

-Simulación Microscópica: Es el análisis que se lleva a cabo en este proyecto ya que es el tipo de análisis más discreto que existe permitiendo el estudio individual de cada vehículo y describiendo el comportamiento del flujo vehicular.

A1.3 Instrucciones de uso y herramientas más usadas

Aimsun Next permite crear la red sobre la que se va a trabajar de tres maneras diferentes: Importar el mapa desde Open Street Maps, importar el mapa desde Autocad o Gis y crear la red desde cero sin una base cartográfica de referencia.

En el presente proyecto ya se contaba con la red construida, pero cabe destacar que el procedimiento seguido es el tercero anteriormente citado y puesto que ha sido necesario llevar a cabo numerosas modificaciones para adaptar la red a las necesidades del estudio del proyecto a continuación se exponen los comandos necesarios para crear una red desde cero.

A1.3.1 Creación de secciones

Lo que Aimsun Next describe como secciones son las vías por donde van a circular los vehículos. Estas se crean desde la barra de herramientas que aparece en el lado izquierdo de la interfaz. Una vez que hemos seleccionado la herramienta de crear sección, a continuación, clicamos en el espacio de trabajo y estiramos para definir la longitud de nuestra calzada. Si a la vez que estiramos hacemos un clic se crea un vértice en la sección, en cambio, si hacemos doble clic la sección se corta.

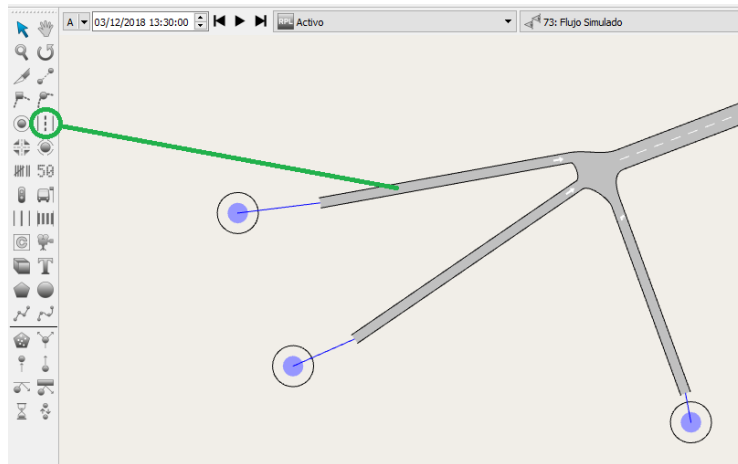


Ilustración A1.3-1 Creación de secciones. Fuente: Aimsun Next

Una vez que se han creado todas las secciones, el siguiente paso es unir las para crear las intersecciones. Esto también se realiza desde una herramienta de la barra izquierda. Es importante tener en cuenta que la sección que se clic primero y desde la que parte la unión determinará el sentido de la circulación.

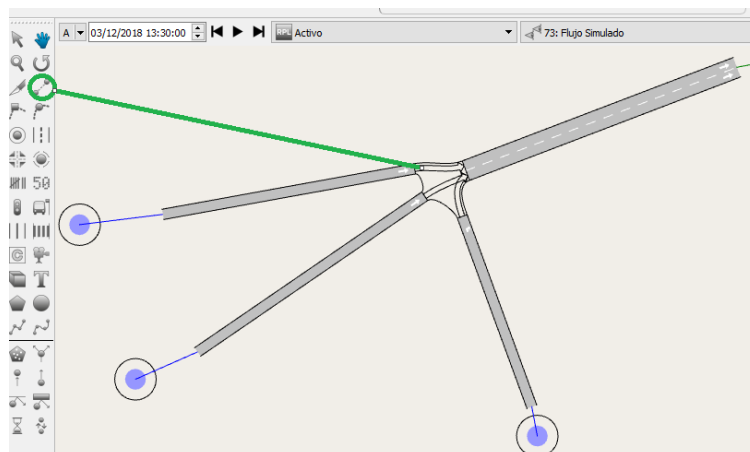


Ilustración A1.3-2 Unión de secciones. Fuente: Aimsun Next

Una vez que la red ha sido creada y las secciones unidas entre sí, el siguiente paso sería determinar las características de cada sección. Seleccionando la sección que deseamos modificar y haciendo clic en el botón derecho aparecerán todas las características de la vía que podemos modificar:

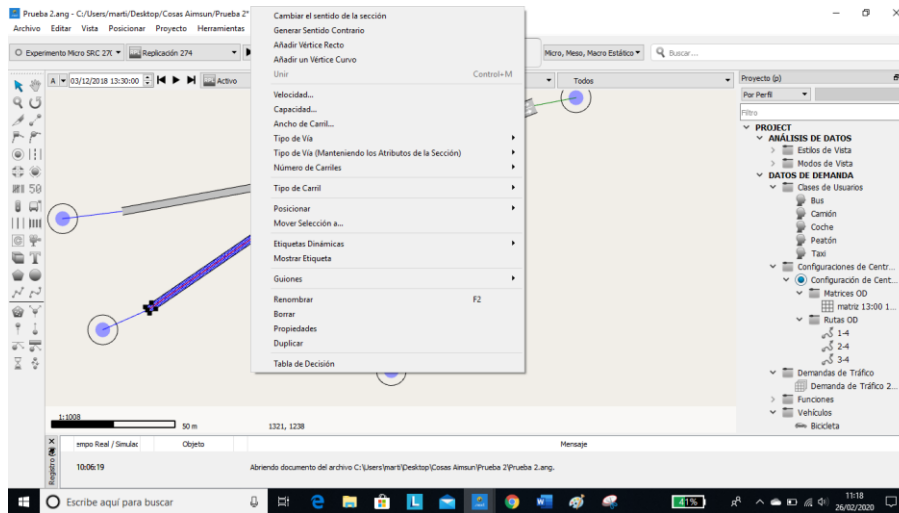


Ilustración A1.3-3 Modificación de secciones. Fuente: Aimsun Next

A1.3.2 Stops, ceda el paso y señalización semafórica

Para intersecciones no semaforizadas lo que hay que crear son señales de Ceda el Paso o Stop. Para ello, se selecciona la intersección y después se hace doble clic sobre el giro que se quiere señalizar. Se abrirá una ventana con el giro seleccionado y a su derecha una casilla desplegable con las opciones de Ceda el Paso o Stop. Si se selecciona la de Stop en la red aparecerá un punto rojo en la sección previo al giro, si lo que se ha colocado es un Ceda el Paso aparecerá un triángulo rojo.

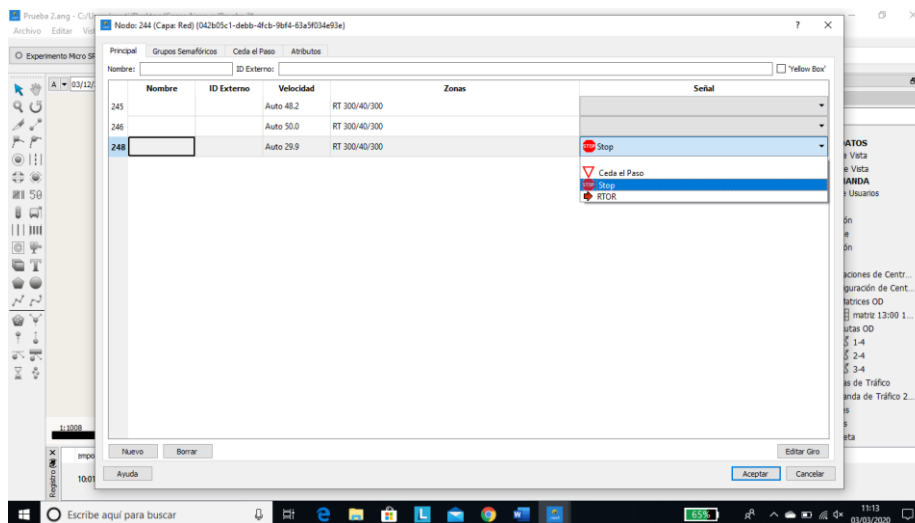


Ilustración A1.3-4 Gestión de Intersecciones. Fuente: Aimsun Next

En el caso de intersecciones semaforizadas es necesario Crear un plan de control semafórico. Para ello lo primero que hay que hacer es crear grupos semafóricos editando los nodos correspondientes de la intersección donde se quiere crear el plan.

Un grupo semafórico es un conjunto de giros que se ponen al mismo tiempo en rojo, ámbar o verde. Cada señal representa un semáforo, aunque puede ser utilizado para dos o más semáforos iguales de secciones distintas.

Para crear los grupos semafóricos es necesario hacer doble clic sobre la intersección y posteriormente seleccionar la pestaña de grupos semafóricos.

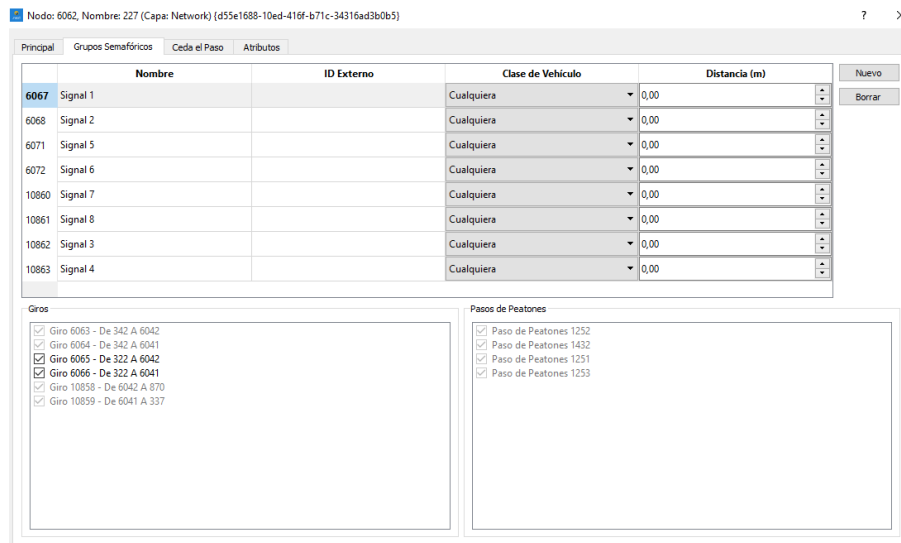


Ilustración A1.3-5 Creación de grupos semafóricos. Fuente: Aimsun Next

Una vez creados los grupos semafóricos para todas las intersecciones de la red hay que crear un plan de control semafórico donde se asigna a cada grupo su tiempo de verde, ámbar y rojo, utilizando el modo grupo.

Finalmente se asignan los tiempos de ámbar utilizando el modo fase. Con este modo también se puede observar que semáforos están abiertos en cada fase del plan de control creado.

A1.3.3 Asignación del tráfico

Una vez que se ha creado la red, se han definido las características de las secciones y se han colocado las diferentes señalizaciones en las intersecciones, debemos asignar el tráfico que va a circular por las mismas.

Aimsun Next ofrece la posibilidad de asignar el tráfico de dos formas diferentes: Mediante estados y mediante centroides y matrices. La red que se utiliza en este proyecto esta creada a partir de centroides y matrices origen-destino, por lo tanto, a continuación, se explica cómo asignar el tráfico utilizando dicho método.

Antes de definir las matrices debemos crear los centroides de entrada y de salida. En nuestra red se representa el barrio de La Rondilla y por lo tanto existirán secciones que sirvan como entrada o salida de dicha red. Dichas secciones han de estar necesariamente conectadas a centroides desde donde partirán o donde llegarán los vehículos que entren y salgan de la red.

Dichos centroides se crean desde la barra de herramientas de la izquierda y una vez creados se han de unir con la herramienta de unión de objetos anteriormente explicada a las diferentes secciones de entrada y salida de la red. Es importante tener en cuenta que cuando utilizemos la herramienta de unir si clicamos primero en el centroide y después en la sección dicho centroide será de Origen puesto que los vehículos partirán

desde él hasta la sección, por el contrario, si clicamos antes en la sección y después en el centroide este será de destino.

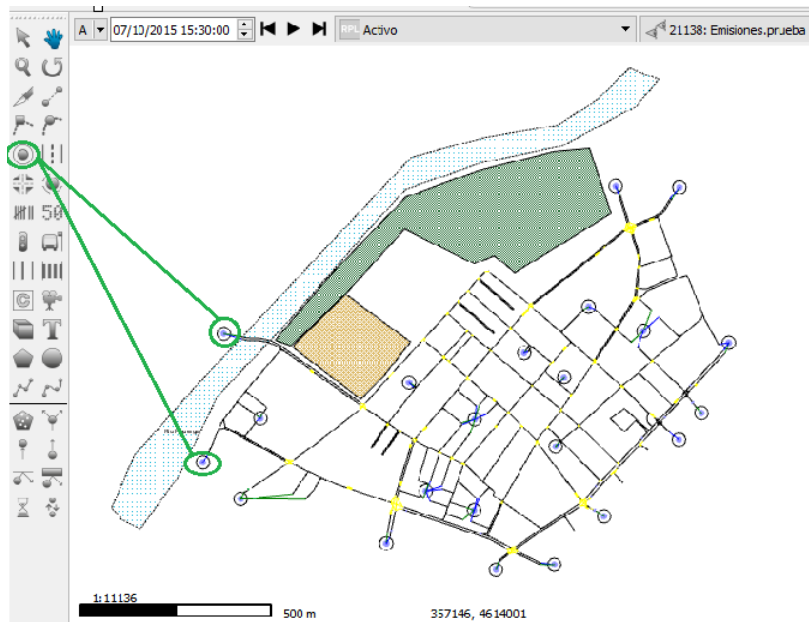


Ilustración A1.3-6 Creación de nodos. Fuente: Aimsun Next

Una vez que hemos creado los centroides y teniendo en cuenta que sean de Origen o de Destino a la hora de crear las matrices estas aparecerán por defecto con los centroides de origen horizontales y os de destino verticales.

Las matrices se crean desde el cuadro de mando de la derecha haciendo clic con el botón derecho sobre “configuración de centroides” y seleccionando “Crear matriz O/D”

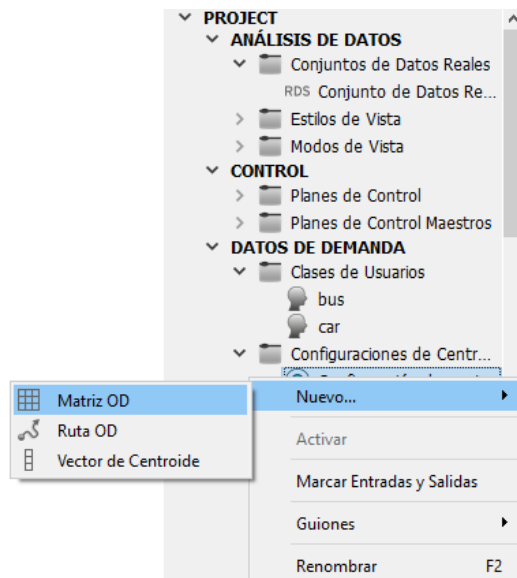


Ilustración A1.3-7 Creación de matrices. Fuente: Aimsun Next

Una vez creada la matriz, si se abre en la pestaña “Principal” tenemos que seleccionar y determinar varias variables de la matriz como el nombre que le vamos a dar, para que tipo de vehículos está definida, el tiempo inicial y la duración. Estas últimas dos variables

determinarán posteriormente cuando se va a simular el tráfico con los datos de dicha matriz y durante cuánto tiempo.

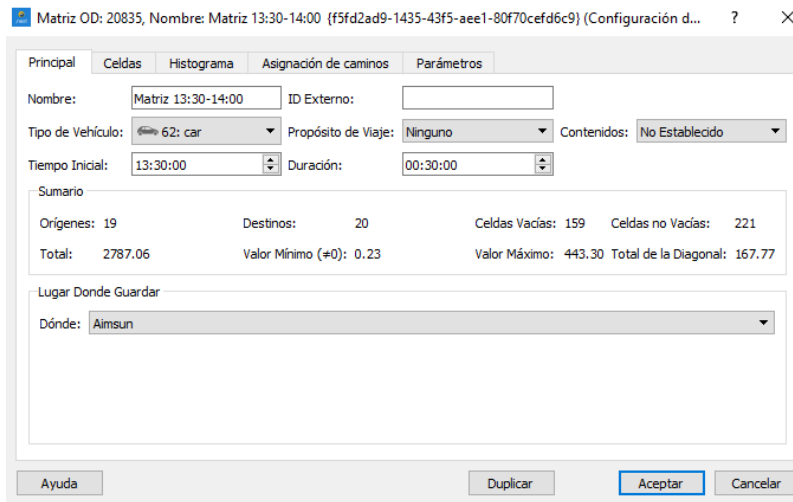


Ilustración A1.3-8 Modificación matrices. Fuente: Aimsun Next

En la pestaña “Celdas” aparece la matriz O/D propiamente dicha con los nodos de origen en la horizontal y los de destino en la vertical. Dentro de cada una de las celdas pondremos el valor del número de vehículos que van desde cada centroide de origen a cada centroide de destino a la hora y durante el tiempo que hemos determinado en “Principal”.

Una vez que hemos introducido dichos datos dentro de la matriz, estos pueden ser modificados y se puede operar con ellos en la barra inferior “Operación”.

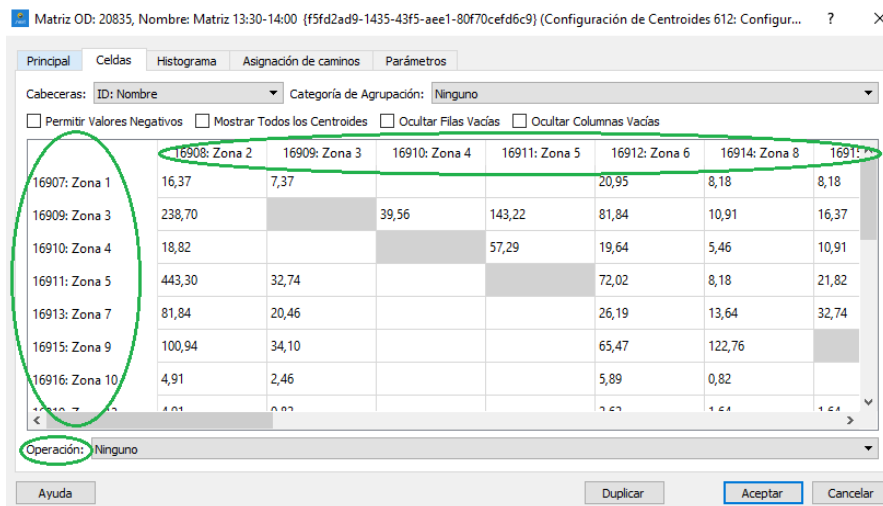


Ilustración A1.3-9 Celdas de las matrices. Fuente: Aimsun Next

Por defecto Aimsun Next determina que todos los vehículos que aparecen en la matriz que van desde un centroide de origen a uno de destino lo harán por la ruta más corta. Esto evidentemente es irreal ya que algunos (la mayoría) lo harán por el camino más corto, pero otros, sin embargo, lo harán por rutas alternativas.

Dichas rutas pueden ser creadas por el usuario haciendo clic derecho en “Configuración de centroides”- “Nuevo”- “Ruta O/D”. Una vez creada la ruta hacemos doble clic sobre ella y ahí podemos asignarle un nombre, y lo que es más importante determinar cuáles son las secciones por las que irán los vehículos desde el centroide O al centroide D. Esta selección de las secciones pertenecientes a la ruta se hará clicando directamente sobre las secciones mientras la ruta se encuentra abierta.

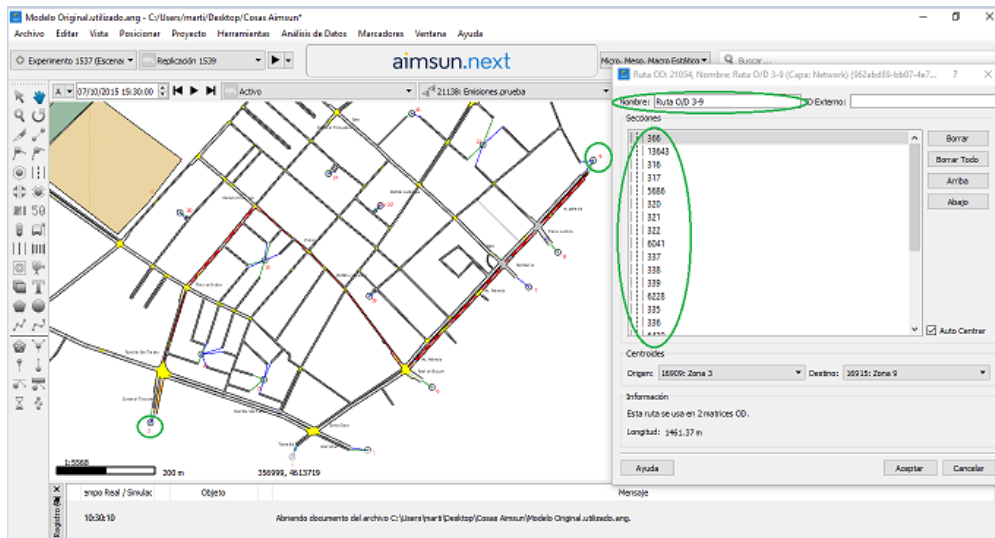


Ilustración A1.3-10 Creación de rutas. Fuente: Aimsun Next

Como se puede apreciar en la imagen la ruta creada corresponde al trayecto desde el centroide de origen 3 al centroide de destino 9. En la red se pueden observar en rojo las secciones seleccionadas para la ruta y en el recuadro de Información aparecen dos datos importantes: la longitud de la ruta y el número de matrices a la que la ruta ha sido asignada.

Este último aspecto es esencial para que la simulación funcione tal y como se desea. Una vez que se ha creado la ruta hay que asignársela a una o varias matrices. Esto se hará abriendo la matriz donde se desea asignar la ruta y situándose en la pestaña de Asignación de caminos. Una vez allí se pondrán el número del centroide de origen y de destino y en la parte inferior aparecerá la ruta que hemos creado con esos centroides.

Dentro de esa ruta hay una casilla que pone porcentaje y es ahí donde se tiene que poner el porcentaje de vehículos que se desea que utilicen esa ruta. El porcentaje restante utilizará por defecto el camino más corto.

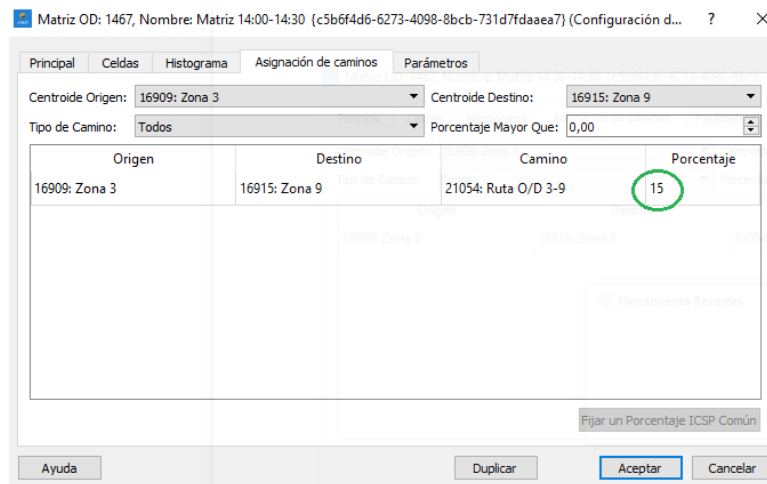


Ilustración A1.3-11 Reparto del tráfico por rutas. Fuente: Aimsun Next

Se observa que la ruta anteriormente descrita (3-9) se asigna a la matriz con nombre 14:00-14:30 y que la seguirán un 15% de los vehículos que estén asignados en esa matriz desde el centroide 3 al 9.

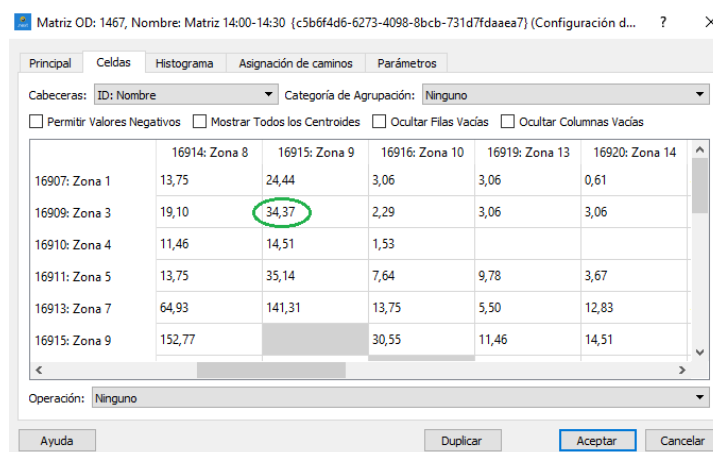


Ilustración A1.3-12 Ejemplo reparto del tráfico por rutas. Fuente: Aimsun Next

Vemos que entre las 14:00 y las 14:30, 34,37 vehículos irán del centroide 3 al 9. Por tanto, un 15% lo harán siguiendo la ruta 3-9 creada y un 85% seguirán el camino más corto.

Mediante la creación y asignación de rutas podremos crear por tanto un sistema más realista.

A1.3.4 Demandas de tráfico para redes con matrices

Una vez han sido creadas las matrices y las rutas han sido asignadas a las misma tenemos que crear y asignar demandas de tráfico a las matrices para que posteriormente la simulación funcione.

Primero creamos una Demanda de tráfico clicando con botón derecho sobre “Demandas de tráfico” y posteriormente sobre “Crear Demanda de tráfico”.

Cuando la Demanda de tráfico se ha creado debemos determinar la hora de inicio y la duración de dicha demanda y posteriormente seleccionar las matrices para esa demanda desde “Añadir elemento de demanda”.

En el presente proyecto se realiza un estudio que abarca desde las 13:30 hasta las 15:30 y está compuesto por 4 matrices de coches.

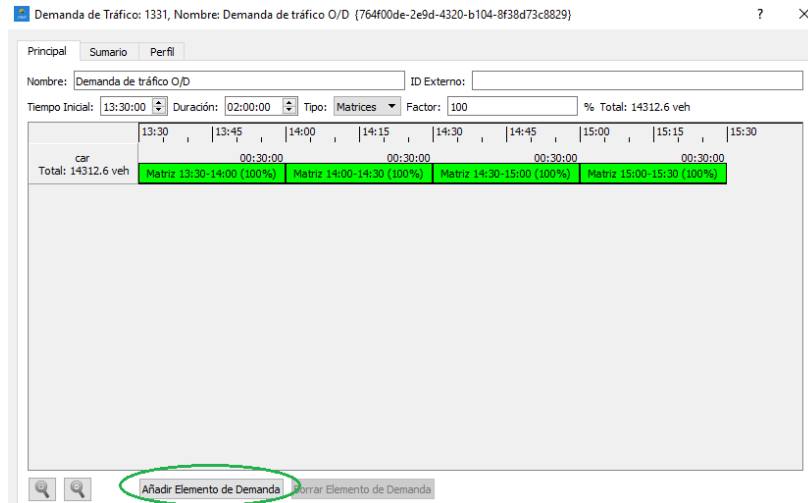


Ilustración A1.3-13 Creación demandas de tráfico. Fuente: Aimsun Next

Se puede apreciar como una vez asignadas las matrices a la Demanda de tráfico aparece el total de vehículos que van a aparecer por la red durante el tiempo que abarca dicha Demanda. En este caso serán 14312,6 vehículos.

A1.3.5 Preparación de la ejecución de la simulación

Una vez que la red ha sido construida y se ha introducido toda la información necesaria para que la simulación represente exactamente lo que se quiere debemos crear un escenario.

La función del escenario es proporcionar e introducir en la simulación todos los datos de entrada procedentes de las asignaciones de tráfico, el control semafórico etc.

Para crearlo clicamos con el botón derecho en “Escenarios” en la barra de la parte derecha y seleccionamos “Nuevo Escenario Dinámico”. Al estar la red creada mediante matrices con un escenario dinámico es suficiente, en el caso de que hubiésemos creado también estados sería conveniente crear un escenario dinámico para matrices y otro para estados.

Una vez creado el escenario si se selecciona se abre una ventana principal donde debemos indicar todos los datos de entrada que deseamos que se utilicen para realizar la simulación: Fecha, tiempo de inicio, duración, demanda de tráfico, red de transporte público, control semafórico etc. Es decir, todo lo que hemos creado antes ha de ser introducido en el escenario para que se simule.

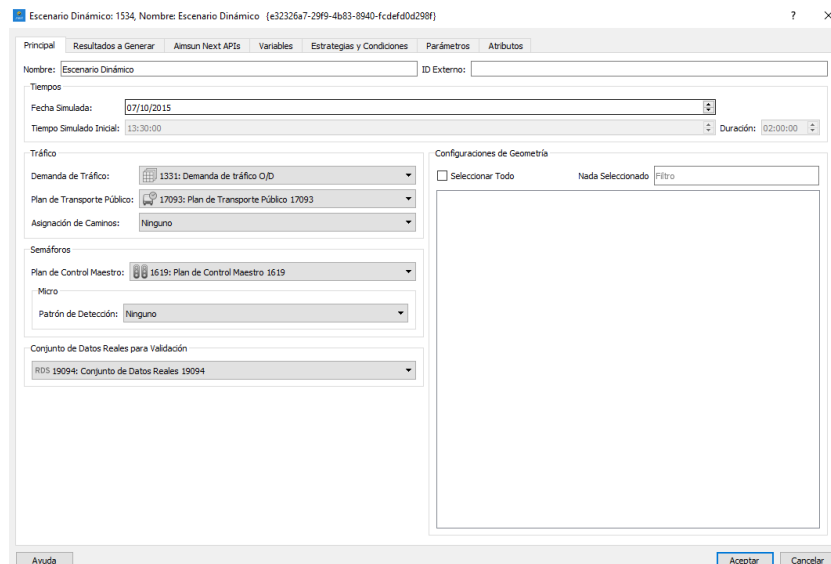


Ilustración A1.3-14 Creación escenarios dinámicos. Fuente: Aimsun Next

Una vez creado y modificado el escenario dinámico es necesario crear un Experimento dentro del Escenario Dinámico. Para ello se clica con el botón derecho en el Escenario y se selecciona “Nuevo Experimento”.

En el caso que se estudia en el presente proyecto solo se llevará a cabo un análisis microscópico por lo tanto con un único experimento es suficiente (Cada experimento se crea para cada tipo de análisis). Dentro del experimento se seleccionarán aspectos importantes como las velocidades y el porcentaje de vehículos que han de seguir las rutas creadas, aunque esto último ya se determinó al asignar las rutas a las matrices.

Finalmente, cuando ya tenemos creado el Escenario Dinámico y dentro de este el Experimento relativo al análisis microscópico tendremos que crear las replicaciones.

En este caso si que es interesante generar varias replicaciones, puesto que cada una simula condiciones diferentes de tráfico y por lo tanto ofrecen datos parecidos pero diferentes. Debido a esto es importante crear también una media dentro del experimento donde se seleccionarán las replicaciones de las cuales se quiere generar la media y así los resultados finales serán lo más realistas posibles.

Tanto las replicaciones como las medias se crean clicando en el botón derecho sobre el experimento y seleccionando “Nueva Replicación” o “Nueva media”.

Una vez se ha creado el Escenario Dinámico, el Experimento y las Replicaciones, el modelo está listo para proceder a la simulación y obtención de datos.

A1.3.6 Ejecución de la simulación y obtención de resultados

Quizá uno de los pasos más importantes sea la ejecución de la simulación y obtención de resultados. Sin embargo, hay que tener en cuenta que si no se han realizado correctamente todos los pasos anteriores puede que la simulación no se ejecute ó de hacerlo, que los resultados no sean fiables.

A1.3.6.1 Tipos de ejecuciones

En este momento el modelo está listo para la simulación. Para llevarla a cabo hay que clicar con el botón derecho sobre la replicación que se vaya a utilizar y seleccionar el tipo de simulación deseada.

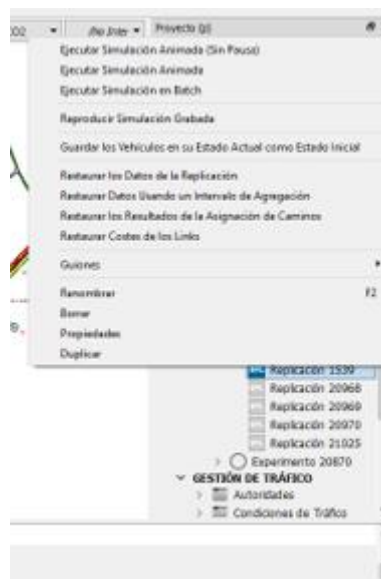


Ilustración A1.3-15 Tipos de ejecuciones y restauración de datos. Fuente: Aimsun Next

Antes de proceder con la simulación es conveniente “Restaurar los Datos de la Replicación” para asegurar que se va a proceder desde el inicio y no con algún dato que se haya podido generar de simulaciones anteriores.

Las dos simulaciones más utilizadas son:

-Simulación Animada (Sin pausa): Se ejecuta una simulación “real”, es decir, el tiempo transcurre desde el inicio de la simulación hasta el final y se pueden ver los vehículos moviéndose por la red. Es un tipo muy visual y es útil si queremos comprobar que todo funciona correctamente, pero, si lo que se pretende es únicamente obtener los datos de la simulación es un procedimiento lento.

-Simulación en Batch: Equivale a realizar una simulación animada, pero se realiza mucho más rápido y no se puede ver la red en funcionamiento. Es muy útil cuando no se quiere ver el funcionamiento de la red y lo que se quiere es obtener los resultados de la simulación rápidamente.

Es importante destacar que ambas simulaciones generan los mismos resultados dentro de la misma replicación.

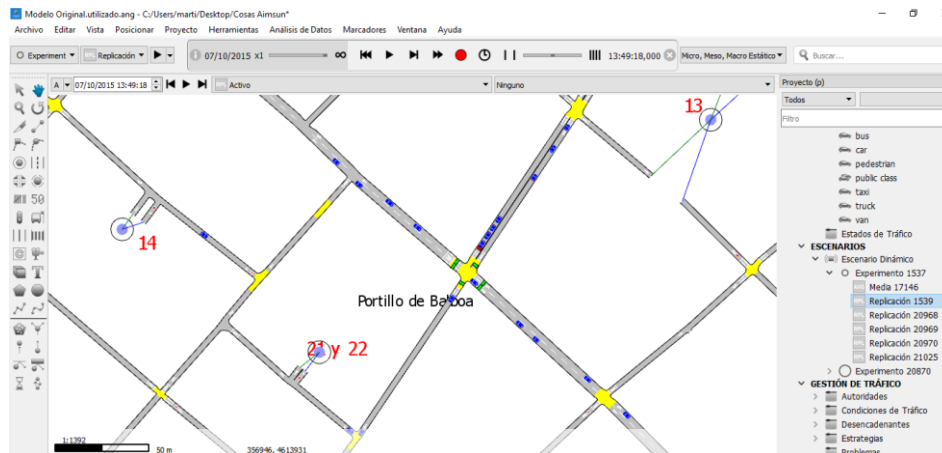


Ilustración A1.3-16 Captura de simulación animada. Fuente: Aimsun Next

A1.3.6.2 Sumario de resultados y series temporales

Una vez que la simulación ha sido ejecutada (en cualquiera de sus variantes) aparece por defecto en el medio de la pantalla una tabla con los resultados.

Serie Temporal	Valor	Desviación Estándar	Unidades
Cola Media - Todos	516,23	ND	veh
Cola Media - car	510,81	ND	veh
Cola Media - bus	5,42	ND	veh
Cola Virtual Máxima - Todos	2584	ND	veh
Cola Virtual Máxima - car	2565	ND	veh
Cola Virtual Máxima - bus	19	ND	veh
Cola Virtual Media - Todos	895,12	ND	veh
Cola Virtual Media - car	889,11	ND	veh
Cola Virtual Media - bus	6,01	ND	veh
Contaje de Entrada - Todos	11930	ND	veh
Contaje de Entrada - car	11887	ND	veh
Contaje de Entrada - bus	43	ND	veh
Densidad - Todos	27,09	ND	veh/km
Densidad - car	26,80	ND	veh/km
Densidad - bus	0,28	ND	veh/km
Distancia Total de Viaje - Todos	8871,33	ND	km
Distancia Total de Viaje - car	8828,80	ND	km

Ilustración A1.3-17 Sumario de resultados. Fuente: Aimsun Next

Si en vez de ver el dato numérico final de la simulación se desea ver la evolución de una determinada variable a lo largo del tiempo se selecciona la pestaña de "Series Temporales". Ahí aparecerá por defecto la gráfica correspondiente al primer valor de la tabla, pero seleccionando en variables podemos determinar que variables deseamos ver en el eje X (tiempo por defecto) y cual en el eje Y. También se pueden modificar aspectos tales como el color de la función o un elemento muy interesante que es representar una línea con la media.

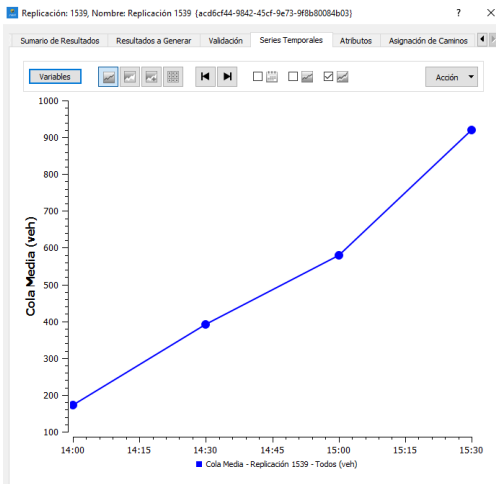


Ilustración A1.3-18 Series temporales 1.
Fuente: Aimsun Next

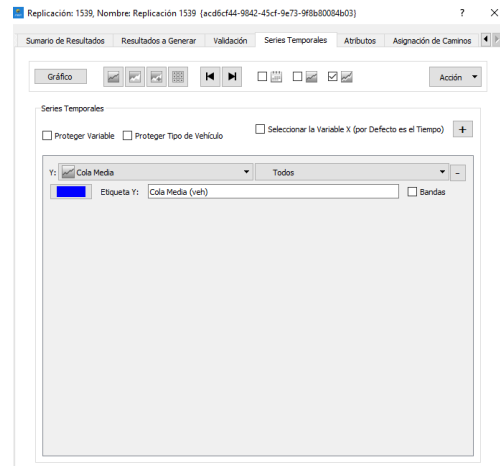


Ilustración A1.3-19 Series temporales 2.
Fuente: Aimsun Next

Todos los datos obtenidos se corresponden con toda la red durante todo el tiempo de la simulación, pero si se quiere analizar únicamente los datos relativos a una sección basta con hacer doble clic sobre dicha sección y se abrirá una ventana similar a la que aparece tras terminar la simulación con los datos únicamente de esa sección.

Si los valores que se generan por defecto tras la simulación son insuficientes se pueden generar muchos más. Para ello, es necesario abrir el Escenario dinámico donde esté la replicación que se va a utilizar seleccionar la pestaña “Resultados a Generar” y ahí seleccionar aquellos que aparezcan en blanco y que se desee obtener.

Para el presente proyecto ha sido necesario que las simulaciones obtengan los datos relativos a las emisiones, para ello ha sido necesario seleccionar “Emisión de Contaminantes” dentro de las pestañas “Resultados a Generar” y “Estadísticas”

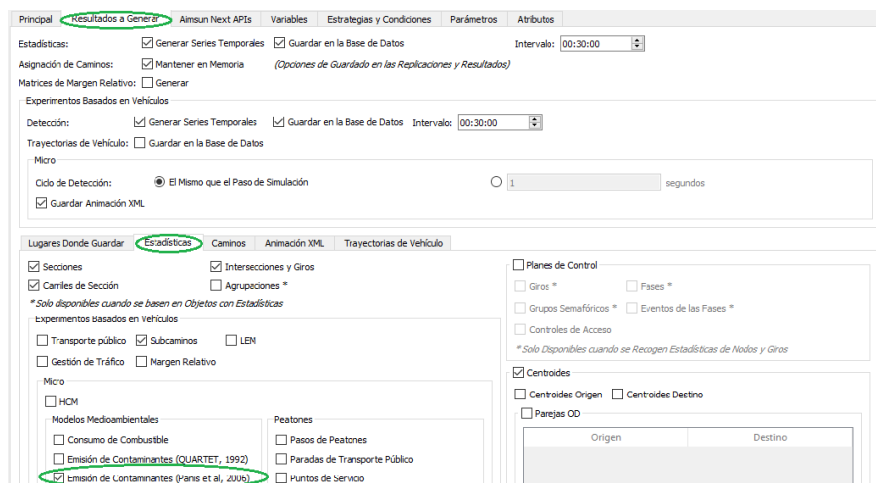


Ilustración A1.3-20 Resultados a generar. Fuente: Aimsun Next

A1.3.6.3 Modos de vista

Una manera muy visual de analizar los resultados obtenidos es mediante el coloreado de las secciones de la red representando una determinada escala de valores. Para ello lo primero es generar un nuevo Modo de Vista. Para ello se clics con el botón derecho sobre Modos de vista (en la barra de la derecha) y se selecciona “Crear Modo de Vista”.

Se abre el modo de vista nuevo que se ha creado y se determina el nombre de la vista y los elementos que se desean mostrar u ocultar cuando ese modo de vista sea seleccionado.

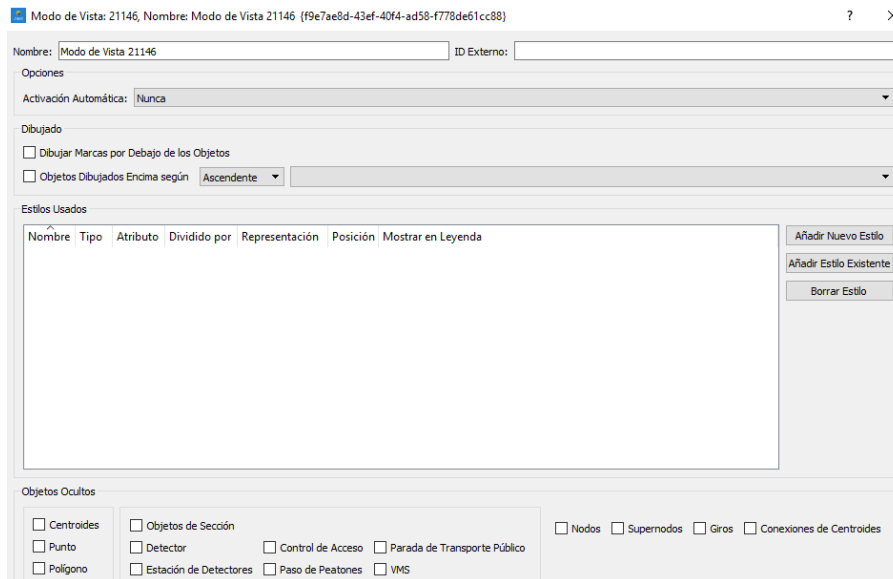


Ilustración A1.3-21 Creación modos de vista. Fuente: Aimsun Next

Cuando ya se ha seleccionado aquello que se desea o no se desea ver en este modo de vista se clics en “Añadir Nuevo Estilo”. Dentro de Nuevo estilo se decide el atributo que se desea ver y el estilo (color, grosor de línea etc) y en que elemento de la red se quiere que se represente (secciones, centroides etc.) Una vez determinado esto se procede a calcular la escala de valores y el color que se quiere que se muestre en las secciones cuyo valor del atributo se encuentre dentro de cada rango de valores.

Cuando ya se han generado los modos de vista que se desean es muy sencillo utilizarlos. Se ejecuta una replicación (en Batch o Animada) y cuando esta ha terminado y aparece la tabla con los resultados obtenidos la cerramos para que se pueda ver la red completa en la pantalla principal.

En la parte superior aparece una pestaña desplegable que por defecto tiene seleccionado “ninguno” si la desplegamos veremos que aparecen todos los modos de vista que hemos creado, seleccionándolos veremos representado en la red el modo de vista tal y como lo hemos creado.

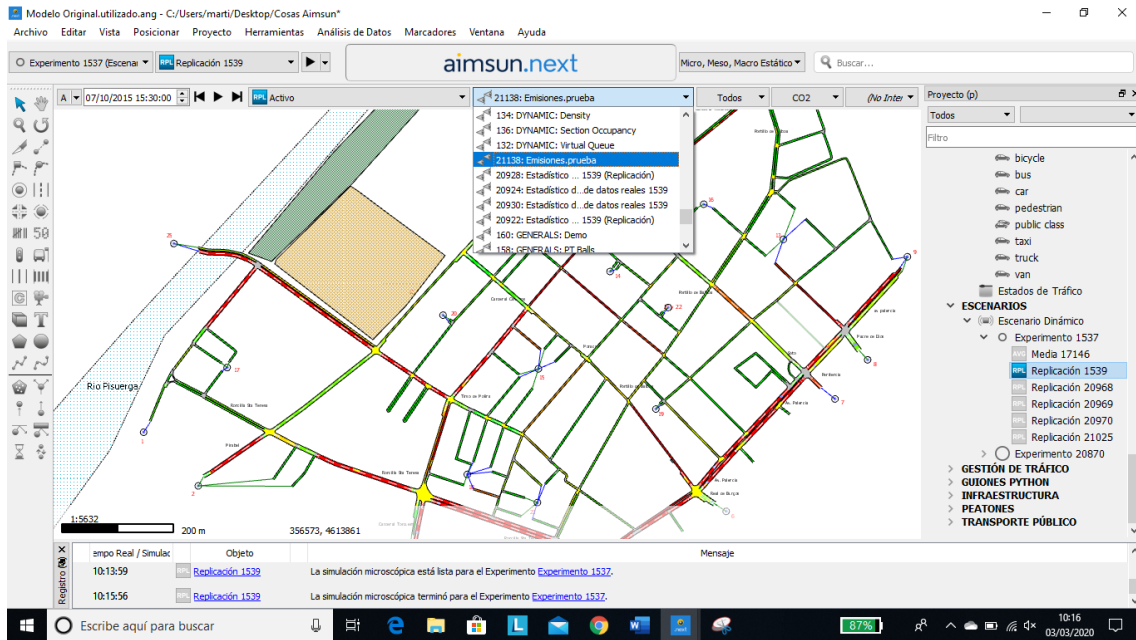


Ilustración A1.3-22 Ejemplo de modo de vista. Fuente: Aimsun Next

En la imagen anterior se puede ver como las secciones de la red se colorean en función de las emisiones de CO2 que se emiten durante las dos horas de la simulación gracias al modo de vista “Emsiones.prueba” que se ha creado específicamente para este proyecto.

A1.3.6.5 Exportación de vistas

Una vez que se obtiene el modo de vista deseado se puede importar a PDF, lo cual es muy interesante a la hora de presentar informes técnicos, además, importándolo a PDF también se podrá incluir la leyenda donde aparece la relación entre los rangos de valores y los colores para que la interpretación del modo de vista sea más sencillo.

Para ello el camino que hay que seguir es: “Proyecto”- “Nuevo”- “Análisis de datos”- “Diseño de impresión”.

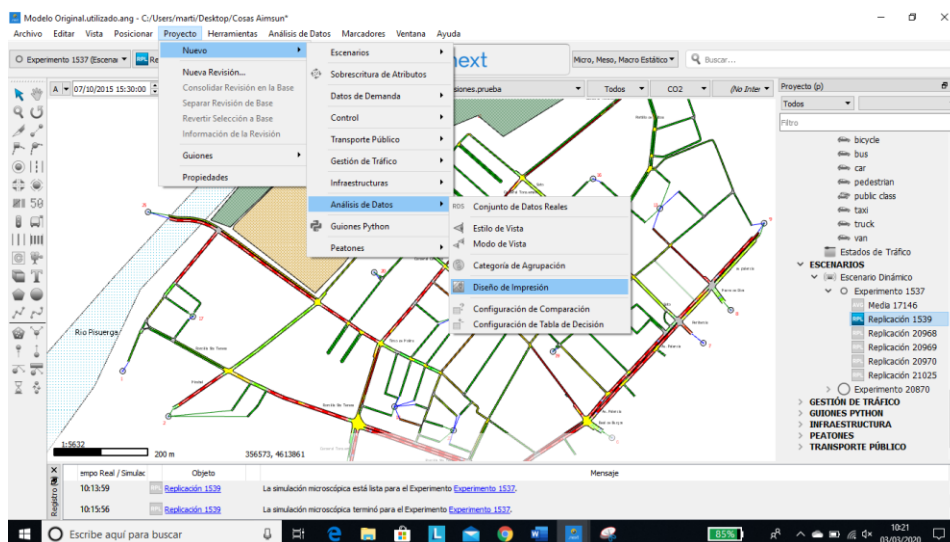


Ilustración A1.3-23 Creación diseño de impresión. Fuente: Aimsun Next

Se crea un diseño de impresión que aparecerá en la barra de la derecha. Abriendo dicho diseño de impresión aparecerá por defecto la red con el modo de vista que en ese momento tengamos en pantalla. A la izquierda existen varias opciones entre ellas la de mostrar leyenda y en la parte superior la de exportar a PDF. De este modo se podrá tener un PDF con la red con el modo de vista que se desee y con la leyenda que represente la relación de colores y rango de datos.

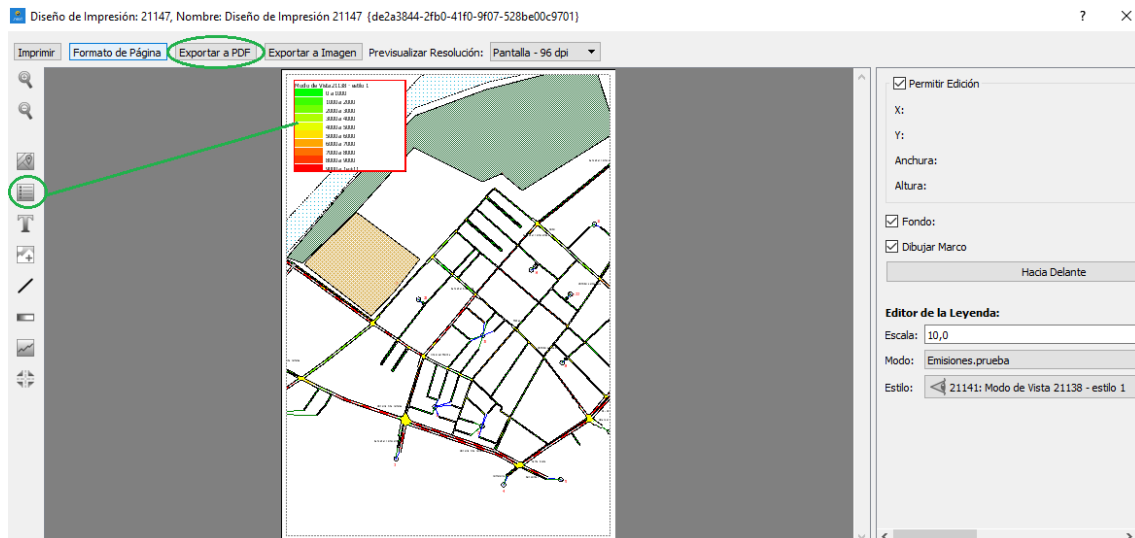


Ilustración A1.3-24 Exportar modo de vista a PDF. Fuente: Aimsun Next

A1.3.7 Características medioambientales

Un aspecto muy importante dentro de este proyecto es el análisis de las emisiones que los vehículos que circulan por la red generan, para ello es necesario determinar las características medioambientales de coches y buses para que la simulación sea lo más realista posible.

Dichos datos pueden ser modificados seleccionando el vehículo en la barra de la derecha (Dentro de la carpeta vehículos). Ahí podemos determinar numerosas características de los vehículos que van a utilizar la red tales como su velocidad máxima y mínima, sus características geométricas y sus imágenes en 2D y en 3D.

Sin embargo, debido a la relevancia que los aspectos medioambientales adquieren en este proyecto son estas características de los vehículos las que se van a explicar con más detenimiento.

En la pestaña de composición de flota se puede seleccionar el porcentaje de coches de la red que utilizarán cada tipo de combustible (gasolina, diésel o Azul).

En el caso de los coches diésel y gasolina además se puede determinar qué porcentaje de coches de cada combustible estará dentro de cada factor euro (Explicación en el capítulo X). Aimsun Next permite generar la flota de vehículos como se desee para también existen dos configuraciones ya determinadas: Londres 2017 y Barcelona 2017 que probablemente sean más realistas que las que el usuario pueda crear.

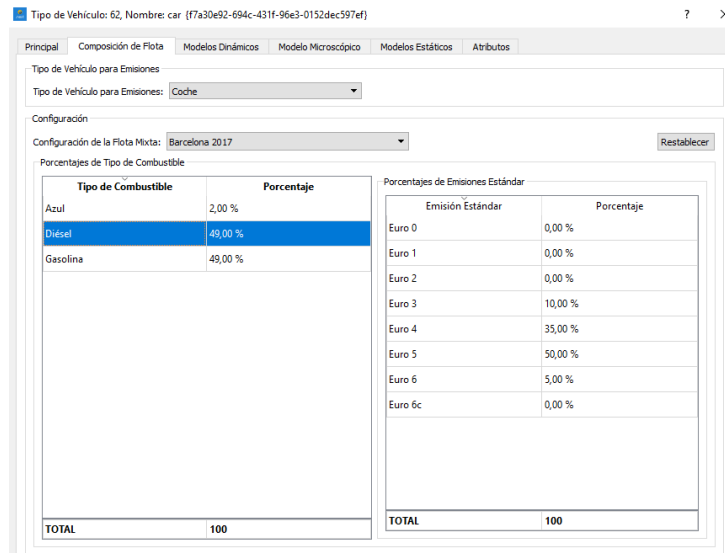


Ilustración A1.3-25 Composición de flota. Fuente: Aimsun Next

Si seleccionamos la pestaña “Modelo Microscópico” y dentro del mismo “Aspectos medioambientales” podemos determinar más características medioambientales del vehículo que se esté tratando. En este proyecto se utiliza el modelo de emisiones Panis et al, por lo tanto, seleccionando su pestaña se puede determinar el porcentaje de coches de cada combustible y el valor de los factores de las fórmulas que utiliza el modelo para el cálculo de las emisiones en función del tipo de combustible

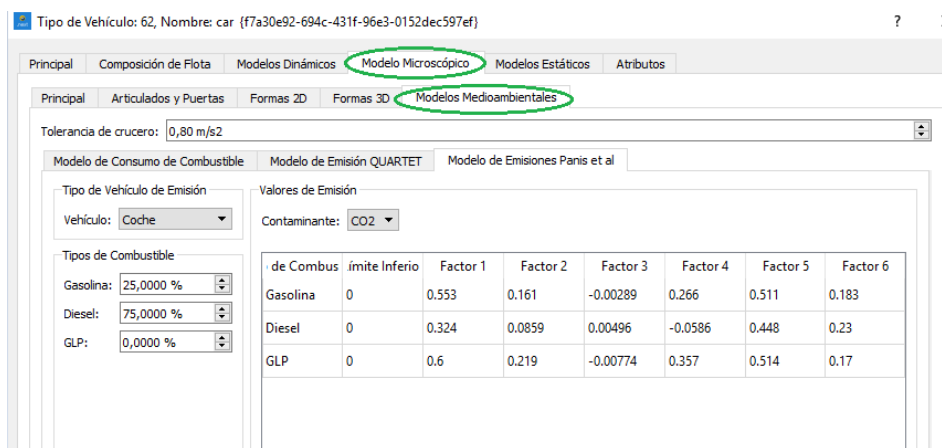


Ilustración A1.3-26 Modelos medioambientales. Fuente: Aimsun Next

Una vez determinadas las características medioambientales de cada vehículo (buses y coches en este proyecto) seleccionando el modelo de emisiones del cual se desean obtener los datos en el escenario dinámico (en el caso de este proyecto es el de Panis et al (2006)) obtendremos los datos relativos a las emisiones producidas por los vehículos en la red.