Ingeniería de **Tránsito**

Fundamentos y aplicaciones

8a. Edición

† Rafael Cal y Mayor R.
James Cárdenas G.

Alfaomega

Los autores:

Rafael Cal y Mayor Reyes Spíndola †
Ingeniero Civil, Universidad Autónoma de México
Ingeniero de Tránsito, University of Yale, New Haven, Connecticut, U.S.A.
Fundador de Cal y Mayor y Asociados, S.C., México, D.F.

James Cárdenas Grisales
Ingeniero Civil, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia
Maestro en Ciencias en Ingeniería de Tránsito, University of Maryland,
College Park, Md, U.S.A.
Profesor titular, Universidad del Valle, Cali, Colombia

Participación especial (capítulo 16):
Ing. Ángel Alceda Hernández

Participación especial (capítulo 17):
Ing. Oscar Salcedo Yusti

Prólogo:
Ing. Guido Radelat Egües

Coordinador de la edición:
L.D.G. Antonio Peralta Arellano

Diseño y diagramación:
L.D.G. Dulce Karina Zaldivar Calderón

Trazos técnicos:
Ing. James Cárdenas Grisales
Tec. Walther Delgado Melo

Fotografía:
Sr. Hugo Téllez Gutiérrez

© 2007 Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V.
Pitágoras 1139, Col. Del Valle, 03100, México D.F.

Miembro de la Cámara Nacional de la Industria Editorial Mexicana
Registro No. 2317

Pág. Web: **http://www.alfaomega.com.mx**
E-mail: **libreriapitagoras@alfaomega.com.mx**

ISBN: 978-970-15-1238-8

Octava edición: México, enero 2007
Primera reimpresión: México, octubre 2007

Esta obra es propiedad intelectual de su autor y los derechos de publicación en lengua española han sido legalmente transferidos al editor. Prohibida su reproducción parcial o total por cualquier medio sin permiso por escrito del propietario de los derechos del Copyright.

Impreso en México. Printed in Mexico.

Presentación

2006 es el año en que la empresa Cal y Mayor y Asociados celebra su treinta aniversario, situación que motivó la actualización y rediseño de este libro y da paso a la octava edición del mismo; está apoyada en las versiones que se publicaron en los años de 1962, 1966, 1972, 1974, 1978 y 1982, todas ellas escritas por el Ingeniero Rafael Cal y Mayor Reyes Spíndola, pionero en América Latina de la Ingeniería de Tránsito y fundador de la empresa, y en la versión de 1994 en la que ya intervino el Ingeniero James Cárdenas Grisales. A él se le encomendó nuevamente la tarea de actualizar el libro. Es menester mencionar que una vez más, el Ingeniero Cárdenas dando muestra de su conocimiento, profesionalismo y capacidad académica, logra un excelente trabajo de modernización de esta obra.

El conocimiento acumulado en las diferentes versiones, la invaluable intervención de James Cárdenas como coautor, la participación especial del Ingeniero Ángel Alceda Hernández y las aportaciones de un nutrido número de especialistas de distintas áreas de la empresa Cal y Mayor y Asociados, han hecho de esta octava edición, un libro fundamental para la consulta y el desarrollo de las personas vinculadas a la Ingeniería de Tránsito. Estudiantes, ingenieros, educadores, legisladores y administradores, entre otros, encontrarán en estas páginas información muy completa sobre las distintas técnicas que se aplican en dicha rama de la ingeniería.

Así también, fiel a su origen y como su autor lo deseaba, este texto seguirá sirviendo como apoyo académico en las carreras de ingeniería e incluso a nivel posgrado; en la presente edición se ha ampliado y profundizado en su contenido, renovado el diseño y las imágenes, trazado nuevos esquemas y colocado ejemplos más acordes con la realidad actual. En otras palabras, se ha traído al presente este libro ya clásico en el mundo de la ingeniería.

Patricio Cal y Mayor Leach, I.C., M.B.A.
Presidente de Cal y Mayor y Asociados

Agradecimientos

Cal y Mayor y Asociados, S.C.

A manera de sencillo reconocimiento agradece a todas las personas, empresas e instituciones que participaron y/o aportaron información para la actualización de este libro.

De manera muy especial al Ing. Oscar Salcedo Yusti, *vicepresidente* de la empresa por conformar, coordinar y supervisar al equipo de profesionales que dieron forma a este esfuerzo.

Al Ing. James Cárdenas Grisales, quien nuevamente asume el reto de actualizar esta obra, realizando una labor invaluable al dejar plasmada toda su experiencia profesional, siendo coautor del libro.

Al Ing. Ángel Alceda Hernández por escribir el capítulo dieciséis *Transporte Público*, y compartirnos su amplio conocimiento en el tema.

Al Ing. Guido Radelat Egües persona que goza de gran reconocimiento en el medio de la ingeniería y que prologa este trabajo.

Al Ing. Gustavo Manzo García quien enriquece el capítulo siete *Dispositivos para el control del tránsito*.

Al Ing. Enrique González Prado por dirigir al equipo de edición, diseño y fotografía, que da cuerpo a este trabajo.

Al personal directivo que nos permitió y apoyó la participación de integrantes de sus diferentes áreas de especialidad:

Ing. Marcos Noguerón Espinosa
Director de Consultoría

Ing. Luis Rosales Correa
Director de Ingeniería

Ing. Marco Antonio Hinojosa Hinojosa
Director de Sudamérica

Al grupo de especialistas integrantes de la empresa quienes con sus amplios conocimientos en diversos temas de la ingeniería, logran hacer de esta octava edición la más completa versión del libro Ingeniería de Tránsito:

Ing. Mauricio Alamillo De Ibarrola
Ing. Oscar Iván Aristizábal Ocampo
Ing. Nicolás Cortés Malagón
Ing. Gabriel De la Flor Fuentes
Ing. Héctor Díaz Cabrera
Ing. Geovanni Infante Malagón
Ing. Sergio Lugo Serrato
Ing. Jenny Maritza Landaeta Espinosa
Ing. Wilder Martínez Riaño
Ing. José Alejandro Saniger Alba

A especialistas externos que también aportaron sus conocimientos:

Ing. Andrés Felipe Guzmán
Arq. Miguel Angel Torres Soto

Y a toda la gente que de alguna forma u otra logró con su esfuerzo entusiasta que este proyecto llegara a un feliz término.

Prólogo

El desarrollo mundial cada vez más acelerado y globalizado, ha hecho del transporte de bienes y personas una necesidad creciente que requiere soluciones eficaces e integrales. El rápido incremento poblacional concentrado en zonas urbanas, los extraordinarios avances tecnológicos en la fabricación de vehículos, las necesidades de movilidad y la atención generalmente deficiente de los sistemas de transporte público de pasajeros, la mejoría en los niveles de ingreso de las personas y las facilidades crecientes para adquisición de vehículos privados, presionan día tras día por una mayor oferta vial y por eficaces sistemas de control del tránsito.

En el acuerdo que no se puede crecer en oferta de infraestructura y de servicios a la misma tasa de la demanda de espacio público y de sistemas de control, es obvio que se genera un rezago que propicia condiciones adversas para la sociedad, al traducirse en congestión, en accidentes y en influencia negativa al ambiente, que de manera acelerada contribuyen al deterioro de la calidad de vida de las personas. La ingeniería de tránsito juega un papel importante dentro de este contexto, al ser una rama que busca hacer estos desplazamientos de manera segura, fluida y con el menor impacto a la sociedad.

Gran parte de la teoría y de los textos de ingeniería de tránsito han sido elaborados en países de gran capacidad económica y con mejores esquemas de organización, con posibilidad de inversiones cuantiosas tanto para incrementar la oferta requerida como para invertir en sistemas de control avanzados y en otros elementos colaterales de gran importancia, como son: legislación – control – capacitación – cultura ciudadana. Sin embargo, la realidad de nuestros países es diferente y estos aportes "foráneos", en la mayoría de los casos no son aplicables directamente a los países latinoamericanos, en donde la escasez de recursos es un factor constante, que obliga al ingenio y a la aplicación de medidas austeras que garanticen un alto grado de efectividad.

La octava edición del libro "Ingeniería de Tránsito, fundamentos y aplicaciones" es un material ambicioso, exquisitamente estructurado, muy completo y útil, el cual con el solo hecho de estar escrito en lengua española y adecuado a las condiciones latinoamericanas, atiende de inmediato las necesidades de una región ávida de conocimientos, necesitada de herramientas y de aplicaciones prácticas.

En la octava edición del libro se introducen varios elementos que lo hacen muy especial y que garantizan su éxito y el beneficio que generará a la sociedad profesional. Uno de ellos es que se haya escrito con el auspicio de la empresa mexicana Cal y Mayor y Asociados, S.C. con vasta experiencia profesional en México, Centro y Sudamérica, que cuenta en su equipo de trabajo con profesionales de diversas nacionalidades. Otro factor fundamental es la coautoría del libro, que al igual que la edición anterior estuvo a cargo del Ing. James Cárdenas Grisales, reconocido especialista en la materia, consultor internacional y académico de importantes universidades del continente. Un elemento relevante adicional lo constituye la colaboración y aportaciones de profesionales del medio latinoamericano, que contribuyen a darle mayor riqueza al libro y a convertirlo en un material de gran utilidad y beneficio para ser aplicado con alta efectividad en nuestro entorno.

La octava edición del libro "Ingeniería de Tránsito, fundamentos y aplicaciones" tiene, además, otra característica especial que lo distingue de todas las ediciones anteriores: la renovación total del capítulo de transporte público. Para su desarrollo se contó con la valiosa colaboración del Ing. Ángel Alceda Hernández, profesional con vasta y reconocida experiencia en el tema del transporte, quien le dio un enfoque renovado y práctico a este trabajo, logrando que en un solo capítulo, el usuario obtenga una visión precisa y amplia del contexto integral del transporte público, desde una óptica general de los diversos sistemas existentes, repasando sus características importantes, hasta presentar de manera sucinta pero muy completa, la metodología básica para realizar los diversos estudios y análisis del transporte público.

El libro Ingeniería de Tránsito de Rafael Cal y Mayor publicado por primera vez en 1962 y sus posteriores ediciones, han llenado un vacío sensible en el medio profesional de la ingeniería de tránsito, lo que le ha permitido convertirse en el libro guía en diversos sectores: estudiantil y académico; profesionales, autoridades y técnicos que han encontrado gran utilidad en el libro. Asimismo, se ha constituido en el texto de universidades en donde se aplica en niveles de pregrado y de posgrado. Luego de revisar con detalle la Octava Edición, no queda duda que seguirá siendo el libro por excelencia y que su aplicación se extenderá e intensificará.

En su octava edición el libro presenta en sus primeros capítulos una visión general que va llevando al lector por una reflexión conceptual sobre el problema del tránsito y su solución; por el concepto del tránsito como un componente de la ingeniería de transporte; por el papel que desempeña cada uno de los elementos empleados: usuario – vehículo – sistema vial; y por la interrelación funcional y operativa que se genera entre ellos. En los capítulos intermedios y finales, el libro trata temas muy especializados como dispositivos de regulación, volúmenes, velocidades, congestión,

estacionamientos, accidentalidad y otros, tratados de manera concienzuda y clara, con un detalle metodológico que permite al usuario del libro entrar en la profundidad de la teoría de cada uno de estos temas, pero a su vez, permitiéndole salir a la superficie con la capacidad de desarrollar aplicaciones prácticas. Apoyado además con una variedad de ejemplos y problemas propuestos que se plantean en cada capítulo el libro redondea su contenido.

Concluyo manifestándoles mi firme convicción sobre la calidad, actualidad y utilidad de la octava edición de este libro, el cual tengo el gusto de prologar, con la absoluta seguridad de que llegará a satisfacer las necesidades de los medios académicos y profesionales, y se convertirá en un excelente aporte a la sociedad en general, pues de su adecuado estudio y de la aplicación de sus fundamentos, se generarán grandes beneficios que contribuirán a reducir la congestión, la accidentalidad y a minimizar el impacto negativo al ambiente.

Dr. Guido Radelat Egües.

Introducción

La infraestructura del sistema vial es uno de los patrimonios más valiosos con el que cuenta cualquier país, por lo que su magnitud y calidad representa uno de los indicadores del grado de desarrollo del mismo. En los últimos años, con el aumento cada vez mayor del parque vehicular, la circulación en las calles y carreteras se ha tornado más compleja, motivo por el cual, cobra gran importancia la realización de análisis operacionales más detallados de los sistemas viales, donde es precisamente la *INGENIERÍA DE TRÁNSITO*, aquella rama de la ingeniería, la llamada a tratar estos aspectos.

Los Ingenieros de Tránsito han podido demostrar la conveniencia de emplear simultáneamente la vigilancia, la educación y la ingeniería en el logro de la meta de una circulación segura y eficiente. De allí que, la mejor manera de utilizar la Ingeniería de Tránsito consiste en estructurar planes adecuados, prácticos y bien meditados para mejorar la seguridad y la movilidad de los flujos vehiculares, sobre todo en áreas críticas, donde la interacción con otras disciplinas es fundamental.

Continuando con la idea original, desarrollada en las ediciones anteriores, relacionada con la difusión de esta materia y acorde con los avances tecnológicos y científicos del momento, la actual edición de la obra *INGENIERÍA DE TRÁNSITO: Fundamentos y Aplicaciones*, presenta los nuevos enfoques del análisis operacional de la circulación de automóviles por calles y carreteras, que sustentan a esta rama de la ingeniería como una profesión dinámica.

Para lograr este objetivo, esta 8ª edición se ha realizado, abordando cada tema mediante su sustentación teórica y conceptual de fácil comprensión, desarrollando una diversidad de ejemplos típicos como una aplicación directa de la teoría, y seleccionando una serie de problemas propuestos al final de cada capítulo con el objetivo de que sean resueltos por el lector como una práctica final. En este sentido, se vierte en este libro, la experiencia profesional y académica ganada en este campo, dándole un enfoque pedagógico.

Los capítulos 1 y 2, *Antecedentes históricos* y el *Problema del tránsito y su solución*, dan al lector un amplio conocimiento de los antecedentes del problema del tránsito, a través de la evolución histórica de las carreteras, las calles, el transporte y el vehículo automotor. Con el propósito de entender los problemas de tránsito, se realiza una interpretación de manera gráfica y analítica de los dos elementos que la originan: la demanda vehicular y la oferta vial. Como corolario del planteamiento presentado se

ntro de un contexto metodológico, las principales vertientes del transporte como lo n: el transporte urbano y suburbano de pasajeros, el transporte foráneo de pasajeros l transporte de bienes. En lo referente a sistemas de transporte masivo, se presenta a reseña histórica del Tren Metropolitano de la Ciudad de México, conocido por el mbre de Metro.

Por último, en el capítulo 17, se hace una presentación de la empresa *Cal y Mayor Asociados, S.C.*, promotora de esta nueva edición. Se presenta una semblanza de su ndador el Ing. Rafael Cal y Mayor Reyes Spíndola, de los lineamientos estratégicos la empresa y de los diversos estudios que realiza y su relación estrecha con el ntenido del libro *INGENIERÍA DE TRÁNSITO*, como una excelente guía de conceptos, ndamentos y aplicaciones de esta rama de la ingeniería, que lo convierte en un aterial obligado de consulta en los sectores académicos y profesionales.

Rafael Cal y Mayor Reyes Spíndola †
James Cárdenas Grisales

Contenido

Capítulo 1 Antecedentes Históricos **01**
1.1 Primeros caminos 02
1.2 Evolución del transporte 04

Capítulo 2 Problema del tránsito y su solución **09**
2.1 Trazo de las carreteras y calles en uso 10
2.2 Trazo urbano actual 11
2.3 Progreso del vehículo de motor 11
2.4 Relación entre la demanda vehicular y la oferta vial 14
2.4.1 Patrón urbano 15
2.4.2 Patrón rural 16
2.5 Factores que intervienen en el problema del tránsito 17
2.6 Tipos de solución 19
2.7 Bases para una solución 23
2.8 Metodología 24
2.9 Especialización 26
Referencias bibliográficas 28

Capítulo 3 Transporte e ingeniería de tránsito **29**
3.1 Generalidades 30
3.2 Definiciones 31
3.3 Sistema de transporte 32
3.3.1 Estructura del sistema de transporte 32
3.3.2 Sistemas y modos de transporte 35
3.4 Alcances de la ingeniería de tránsito 37
Referencias bibliográficas 39

Capítulo 4 Usuario 41
4.1 Generalidades 42
4.2 Peatón 43
4.3 Ciclista 48
4.4 Conductor 50
4.5 Visión 51
4.6 Reacciones físicas y psicológicas 55
4.7 Distancia para detener un vehículo 57
4.8 Problemas propuestos 71
Referencias bibliográficas 73

Capítulo 5 Vehículo 75
5.1 Registro mundial 76
5.2 Estadística de méxico 80
5.3 Inspección del vehículo 81
5.4 Características de los vehículos de proyecto 83
5.5 Radio y peralte de curvas 89
5.6 Problemas propuestos 100
Referencias bibliográficas 101

Capítulo 6 Sistema vial 103
6.1 Generalidaes 104
6.2 Clasificación de una red vial 106
6.2.1 Clasificación funcional 106
6.2.2 Sistema vial urbano 108
6.2.3 Tipo de carreteras 110
6.3 Estructura de una carretera 112
6.4 Especificaciones geométricas de las carreteras 114
6.5 Desarrollo de las carreteras en México 115
Referencias bibliográficas 120

Capítulo 7 Dispositivos para el control del tránsito 121
7.1 Antecedentes 122
7.2 Clasificación de los dispositivos de control 124
7.3 Requisitos 126
7.4 Señales preventivas 127

7.5 Señales restrictivas 129
7.6 Señales informativas 134
7.6.1 Señales informativas de identificación 134
7.6.2 Señales informativas de destino 135
7.6.3 Señales informativas de recomendación 135
7.6.4 Señales de información general 139
7.6.5 Señales informativas de servicios y turísticas 141
7.7 Señales diversas 143
7.8 Marcas 143
7.9 Dispositivos para protección en obras 147
7.9.1 Señalamiento horizontal 147
7.9.2 Señalamiento vertical 147
7.9.3 Dispositivos de canalización 150
7.10 Semáforos 151
7.11 Proyectos de señalamiento tipo 155
7.11.1 Un caso particular 155
7.11.2 Ejemplos de proyectos de señalamiento 160
Referencias bibliográficas 164

Capítulo 8 Vólumen de tránsito 167
8.1 Generalidades 168
8.2 Definiciones 168
8.2.1 Volumen, tasa de flujo, demanda y capacidad 168
8.2.2 Volúmenes de tránsito absolutos o totales 170
8.2.3 Volúmenes de tránsito promedio diarios 171
8.2.4 Volúmenes de tránsito horarios 172
8.3 Uso de los volúmenes de tránsito 175
8.4 Características de los volúmenes de tránsito 178
8.4.1 Distribución y composición del volumen de tránsito 178
8.4.2 Variación del volumen de tránsito en la hora de máxima demanda 179
8.4.3 Variación horaria del volumen de tránsito 183
8.4.4 Variación diaria del volumen de tránsito 183
8.4.5 Variación mensual del volumen de tránsito 185
8.5 Volúmenes de tránsito futuros 189
8.5.1 Relación entre el volumen horario de proyecto y el tránsito promedio diario anual 189

8.5.2 Relación entre los volúmenes de tránsito promedio diario, anual y semanal 191
8.5.3 Ajuste y expansión de volúmenes de tránsito 196
8.5.4 Pronóstico del volumen de tránsito futuro 202
8.5.5 Regresión matemática para el cálculo de volúmenes de tránsito futuro 210
8.6 Estudio de volúmenes de tránsito 223
8.7 Problemas propuestos 225
Referencias bibliográficas 229

Capítulo 9 Velocidad 231
9.1 Generalidades 232
9.2 Antecedentes 232
9.3 Definiciones 235
9.3.1 Velocidad en general 235
9.3.2 Velocidad de punto 237
9.3.3 Velocidad instantánea 238
9.3.4 Velocidad media temporal 238
9.3.5 Velocidad media espacial 239
9.3.6 Velocidad de recorrido 247
9.3.7 Velocidad de marcha 248
9.3.8 Velocidad de proyecto 250
9.4 Estudios de velocidad 250
9.4.1 Estudios de velocidad de punto 251
9.4.2 Estudios de velocidad de recorrido 263
9.5 Problemas propuestos 271
Referencias bibliográficas 274

Capítulo 10 Análisis del flujo vehicular 275
10.1 Generalidades 276
10.2 Conceptos fundamentales 276
10.2.1 Variables relacionadas con el flujo 277
10.2.2 Variables relacionadas con la velocidad 282
10.2.3 Variables relacionadas con la densidad 283
10.2.4 Relación entre el flujo, la velocidad, la densidad, el intervalo y el espaciamiento 290

10.3 Modelos básicos del flujo vehicular 293
10.3.1 Modelo lineal 294
10.3.2 Modelos no lineales 305
10.4 Descripción probabilística del flujo vehicular 310
10.5 Problemas propuestos 320
Referencias bibliográficas 325

Capítulo 11 Análisis de la congestión 327
11.1 Generalidades 328
11.2 Significado analítico de la congestión 329
11.3 Elementos de un sistema de filas de espera 330
11.4 Análisis determinístico del congestionamiento 333
11.4.1 Análisis de intersecciones con semáforos con régimen D/D/1 333
11.4.2 Análisis de cuellos de botella 339
11.5 Análisis probabilístico de líneas de espera 343
11.5.1 Sistema de líneas de espera con una estación de servicio 343
11.5.2 Sistema de líneas de espera con varias estaciones de servicio 346
11.6 Problemas propuestos 349
Referencias bibliográficas 352

Capítulo 12 Capacidad vial 353
12.1 Generalidades 354
12.2 Principios y conceptos generales 355
12.2.1 Concepto de capacidad vial 355
12.2.2 Concepto de nivel de servicio 355
12.2.3 Condiciones prevalecientes 356
12.2.4 Condiciones base o ideales 357
12.3 Criterios de análisis de capacidad y niveles de servicio 357
12.3.1 Criterios 357
12.3.2 Niveles de análisis 360
12.4 Segmentos básicos de autopistas 361
12.4.1 Niveles de servicio 362
12.4.2 Características básicas 364

12.4.3 Análisis operacional 364
12.4.4 Análisis de proyecto o diseño 376
12.4.5 Análisis de planeamiento 380
12.5 Carreteras de carriles múltiples 382
12.5.1 Características básicas 382
12.5.2 Análisis operacional 382
12.5.3 Análisis de proyecto 390
12.5.4 Análisis de planeamiento 390
12.6 Carreteras de dos carriles 390
12.6.1 Características generales 390
12.6.2 Condiciones base 391
12.6.3 Niveles de servicio 392
12.6.4 Segmentos bidireccionales 393
12.6.5 Segmentos direccionales 403
12.7 Intersecciones con semáforos 409
12.7.1 Características generales 409
12.7.2 Niveles de servicio 410
12.7.3 Metodología de análisis operacional 411
12.8 Procedimientos computarizados 428
12.9 Problemas propuestos 429
Referencias bibliográficas 433

Capítulo 13 Semaforización 435
13.1 Generalidades 436
13.2 Ventajas y desventajas 437
13.3 Número de lentes y caras 438
13.4 Semáforos de tiempo fijo 441
13.5 Distribución de los tiempos del semáforo 444
13.5.1 Términos básicos 444
13.5.2 Cálculo de los tiempos del semáforo 446
13.6 Coordinación de semáforos 465
13.6.1 Sistemas de coordinación 465
13.6.2 Diagrama espacio-tiempo 467
13.7 Semáforos accionados por el tránsito 469
13.7.1 Características generales 469
13.7.2 Control semiaccionado 471
13.7.3 Control totalmente accionado 472

13.7.4 Control volumen-densidad o adaptable 473
13.7.5 Detectores 474
13.8 La nueva tecnología 475
13.8.1 Sistemas computarizados de semáforos 475
13.8.2 Programas de cómputo 476
13.9 Problemas propuestos 480
Referencias bibliográficas 483

Capítulo 14 Estacionamientos 485
14.1 Generalidades 486
14.2 Definiciones 486
14.3 Tipos de estacionamientos 490
14.3.1 Estacionamientos en la vía pública 490
14.3.2 Estacionamientos fuera de la vía pública 491
14.4 Oferta y demanda 492
14.5 Normas de proyecto 497
14.5.1 Estacionamientos fuera de la vía pública 497
14.5.2 Recomendaciones generales 498
14.6 Problemas propuestos 501
Referencias bibliográficas 507

Capítulo 15 Accidentalidad 509
15.1 Generalidades 510
15.2 Estudios de accidentes 511
15.2.1 Causas aparentes y reales 511
15.2.2 Magnitud del problema 512
15.3 Causas de los accidentes 516
15.4 Estadísticas de accidentes 520
15.5 Análisis de los accidentes 521
15.6 Programa preventivo 526
15.7 Auditorías de seguridad vial 531
15.7.1 Marco conceptual 531
15.7.2 Fases de las auditorías de seguridad vial 532
15.8 Problemas propuestos 534
Referencias bibliográficas 535

Capítulo 16 Transporte público 537
16.1 Generalidades 538
16.2 Tipos de transporte público 541
16.3 Transporte público urbano 543
16.4 El funcionamiento del transporte como un todo 553
16.5 Transporte público foráneo 554
16.6 El transporte público irregular 555
16.7 Otros medios de transporte 556
16.8 Pros y contras del transporte público 557
16.9 Forma de cobro a los usuarios 557
16.10 Viabilidad económica 560
16.11 Sustentabilidad 561
16.12 Contexto metodológico 561
16.12.1 El Transporte urbano y suburbano de personas 561
16.12.2 El Transporte foráneo de pasajeros 566
16.12.3 El transporte de bienes (carga) 567
16.12.4 El caso de los taxis 568
16.13 Reflexión pertinente 568
Referencias bibliográficas 570

Capítulo 17 Cal y Mayor 571
17.1 Semblanza del fundador 572
17.2 Cal y Mayor y Asociados 574
17.2.1 Visión 575
17.2.2 Misión 575
17.2.3 Valores empresariales 575
17.2.4 Características de liderazgo 575
17.2.5 Política de calidad 575
17.3 Tipos de estudios 576
17.3.1 Estudio de aforos e ingresos en carreteras y autopistas 577
17.3.2 Sistemas de administración de tránsito 578
17.3.3 Estudios de movilidad y transporte urbano 581
17.3.4 Diseño geométrico y proyecto ejecutivo 583

1

Antecedentes históricos

Para empezar, se hará un breve repaso en la escala del tiempo para darnos cuenta de cómo el vehículo, que actualmente satura las calles y carreteras, se ha incorporado a la vida cotidiana y la importancia que tiene hoy en día. Algunos pueden pensar que el vehículo que se observa todos los días no constituye ninguna novedad y, sin embargo, se verá que su edad es insignificante, comparada con la de las ciudades y la de muchos caminos [1].

Según algunos antropólogos, basados en los estudios de restos humanos y reliquias arqueológicas, el ser humano existe sobre la Tierra cuando menos hace unos 100,000 años. Por los vestigios dejados por los primitivos, principalmente en los valles de algunos ríos del mundo como el Nilo, el Eúfrates y el Ganges, se supone que desde hace aproximadamente unos 10,000 años el hombre llegó a conocer la agricultura y empezó a fijar su lugar de residencia, abandonando el nomadismo. Los estudios arqueológicos dicen, sin embargo, que las antiguas civilizaciones florecieron hasta hace unos 6,000 años.

1.1 Primeros caminos

Más tarde, con la invención de la rueda, probablemente en Mesopotamia (Asia Menor), hace unos 5,000 años, se originó la necesidad de construir superficies de rodamiento que permitieran la circulación del incipiente tránsito de entonces. Lo anterior se supone debido a que, en la *Tumba de la Reina,* en las minas de la ciudad de Ur, Mesopotamia [2], se encontraron carretas de cuatro ruedas, que datan del año 3000 A.C.

En esa época, dos grandes pueblos -el Asirio y el Egipcio- iniciaron el desarrollo de sus caminos. Los indicios de los primeros caminos, señalan la existencia de una ruta entre Asia y Egipto. Los cartagineses, se sabe, construyeron un sistema de caminos de piedra a lo largo de la costa sur del Mediterráneo, 500 A.C. Los etruscos (830-350 A.C.) construyeron caminos antes de la fundación de Roma. El historiador griego Heródoto (484-425 A.C.) menciona que los caminos de piedra más antiguos fueron construidos por el rey Keops de Egipto, para proporcionar una superficie de rodamiento al transporte de las inmensas piedras destinadas a la erección de las pirámides.

Los primeros caminos construidos científicamente aparecen con el advenimiento del Imperio Romano. Cabe citar la mundialmente famosa Vía Appia, de Roma a Hidruntum, ilustrada en el mapa de la figura 1.1, cuya construcción fue iniciada por Appius Claudius en el año 312 A.C. La evidencia justifica el conceder el mérito a los romanos por iniciar el método científico de la construcción de caminos. Las culturas antiguas de América, entre ellas la de los mayas (posiblemente antes de la era Cristiana), en el sur de México y norte de Centro América; la de los toltecas, que se establecieron en la Meseta Central, en México, por el año 752; los aztecas (que fundaron Tenochtitlan, hoy Ciudad de México, en el año 1325), y los incas (1100 A.C.), en el Perú, dejaron huellas de una avanzada técnica en la construcción de caminos, siendo notables los llamados *Caminos Blancos* de los mayas. Estos últimos, formados con terraplenes de uno y dos metros de elevación, eran cubiertos con una superficie de piedra caliza, cuyos vestigios existen actualmente en Yucatán, México.

Figura 1.1 *Vía Appia, de Roma a Hidruntum*

Los incas, en el Perú, realizaron verdaderas obras de ingeniería dada la accidentada topografía de su suelo, para construir caminos que, aunque no destinados al tránsito de vehículos, denotaban un movimiento importante. El imperio azteca, en México, pudo extenderse desde la costa del Golfo de México hasta la zona costera del Pacífico, gracias a rutas trazadas por los indígenas. Las crónicas españolas de la época de la conquista (año 1521) mencionan que la capital azteca estaba situada en una isla al centro de un lago y que grandes calzadas la comunicaban con tierra firme. Estas calzadas incluían puentes levadizos por la gran cantidad de barcas que cruzaban de un lado a otro.

1.2 Evolución del transporte

A través de los siglos se puede observar la evolución que ha tenido el tránsito a medida que también evolucionan, tanto el camino como el vehículo.

Durante los siglos I, II y III de nuestra era, el Imperio Romano fue factor dominante para la comunicación desde la Península Ibérica hasta China. Los siglos IV, V y VI ven la declinación del Imperio, la desaparición de la red caminera y el retorno a la bestia de carga. En el siglo VII el sistema feudal fuerza la reducción de la población y los viajes, y a mediados del siglo se abandona todo esfuerzo por conservar las rutas imperiales. Durante este siglo y el siguiente, el comercio vuelve a extenderse a través de rutas terrestres, precedido por la invasión de los vikingos, desde el norte, y de los sarracenos, desde el sur.

Hasta el siglo IX la economía feudal, las guerras civiles y las invasiones, incluyendo la de los turcos, contrarrestan los esfuerzos por extender el comercio y conservar las rutas terrestres. El siglo X, iniciación de la Edad Media, registra un incremento en la población, en el comercio y, como consecuencia, mayor tránsito, influido principalmente por los vikingos del norte, los mercaderes de Venecia y el renovado contacto con el Lejano Oriente. Las Cruzadas, que principian en el siglo XI, vienen a contribuir grandemente a la apertura de muchos caminos y al incremento de la población y los viajes.

En el siglo XII las ciudades crecen extraordinariamente, emergiendo muchas nuevas vinculadas en forma estrecha con el comercio; su trazo es básicamente el de calles angostas agrupadas según una cuadrícula geométrica. Dicho trazo, que algunos atribuyen a Hipodamo de Mileto, data de varios siglos antes de Cristo y se observa aún en las ruinas de algunas ciudades anteriores a la Era Cristiana. Las ciudades griegas de Asia se planearon como un tablero de ajedrez, introducidas por primera vez en Mileto al ser reconstruida después de la derrota persa, en el año 479 A.C., por Hipodamo [3]. Durante el siglo XIII la población llega a un máximo, aumentando el tránsito en los mal conservados caminos. Los caballeros armados contribuyen a conservar los caminos abiertos al tránsito de cabalgaduras y los religiosos brindan amparo al viajero.

Excepto París y algunas ciudades italianas, poco se hace para mejorar las calles de la mayoría de las ciudades. En algunos casos se pavimentan las vías principales, pero, en general, no existen programas para mejorarlas. En el siglo XIV el aumento del transporte y del tránsito llega a un máximo y, a la vez, se inicia una rápida reducción debido a la erosión social y económica que mina la cimentación de la sociedad feudal.

Hay varios factores que contribuyen a reducir el tránsito en los caminos, tales como la poca protección a los viajeros, la multiplicación de los asaltantes, la gran peste (1348-50) y la invasión de los turcos, en la parte sudoriental de Europa.

En el siglo XV, la población y el tránsito, restringidos hasta 1453 por la guerra de 100 años entre Inglaterra y Francia, empieza a resurgir. En el siguiente siglo la población de Europa se duplica y el tránsito se multiplica en razón directa, surgiendo los primeros mapas de caminos y reaparecen los vehículos, los cuales habían sido desplazados por el caballo y las bestias de carga; es decir, es hasta el siglo XVI en que

el vehículo vuelve a influir en la vida económica de Europa. A mediados de ese mismo siglo los conquistadores españoles inician la construcción de caminos en América como medio para extender su colonización y explotación de recursos en la Nueva España.

Durante este siglo y el XVII, a pesar de una falta de gobiernos centrales que se preocupen por los caminos, siguen haciéndose esfuerzos por mejorar algunos existentes y se multiplica el número de vehículos tirados por los animales. La industrialización de algunas regiones contribuye a aumentar el uso de los mismos. La carreta fue introducida en América durante el siglo XVI por el español Sebastián de Aparicio. Él construyó la primera carretera del Nuevo Mundo, entre México y Veracruz, aproximadamente entre 1540 y 1550. Más tarde construyó la carretera México-Zacatecas, uno de cuyos puentes más antiguos se muestra en la fotografía de la figura 1.2, el cual está localizado a un kilómetro de la carretera entre San Juan del Río y Tequisquiapan, Querétaro, a unos 10 kilómetros de esta última población.

Figura 1.2 *Puente antiguo en ruta colonial México-Zacatecas, 1561*

El siglo XVIII marca la iniciación de la Era Moderna. El tránsito se incrementa con grandes esfuerzos, debido al mal estado de los caminos. A su desarrollo contribuye enormemente la introducción del cobro de cuotas de peaje, que permiten la construcción y conservación de estos caminos. Esta práctica se hace común tanto en Europa como en las colonias americanas. En los Estados Unidos el desarrollo de estos caminos influye grandemente en la expansión del territorio y, a la vez, en su fortalecimiento económico. En este siglo las diligencias dominan el tránsito, extendiendo bastante las zonas de influencia de la industria y el comercio.

El siglo XIX se inicia con un incremento inusitado de la población y la "Época de Oro" de las diligencias (1800-1830). También, desde principios del siglo, empieza

a experimentarse con vehículos de autopropulsión, utilizando la fuerza del vapor. El ferrocarril de vapor inicia servicios comerciales en Inglaterra entre 1825 y 1830.

De 1837 a 1876 el ferrocarril progresa, se desarrolla y se coloca a la vanguardia de los medios de transporte, haciendo que los caminos queden relegados a un segundo término.

Con la aparición del vehículo de motor y por la tendencia a su uso privado, se fueron incrementando los problemas de tránsito urbano, debido a que paralelamente surgieron los vehículos de transporte público. Así, los sistemas de transporte férreo masivo, como transporte público, tuvieron sus orígenes en los tranvías, los cuales se desarrollaron en la segunda mitad del siglo XIX, inicialmente propulsados por animales y posteriormente con tracción mecánica, y para finales de ese mismo siglo ya operaban con fuerza eléctrica [4].

El tren subterráneo (metro) nació hace más de un siglo en Londres, Inglaterra, el 10 de enero de 1863, que en aquel entonces era la ciudad más poblada del mundo. En el período comprendido entre 1848 y 1873, la Gran Bretaña se convirtió en uno de los países de mayor libertad de comercio en toda Europa. Como reflejo de esa integración de mercados que produjeron rápidos aumentos de productividad, nuevas tecnologías de fabricación y desarrollo de la industria local, ciudades como Nueva York y Chicago, construyeron el tren subterráneo (metro) en los años 1867 y 1882, respectivamente [4].

Las últimas décadas del siglo XIX ven la aparición del automóvil con motor de gasolina y renace el deseo de conservar en buen estado los caminos que habían sido abandonados una vez más.

Puede afirmarse que el vehículo de motor de combustión interna en la forma que se conoce actualmente, forma parte y nació con el siglo XX. Al iniciar su vida y considerado como un artefacto de lujo y deporte, encontró serios obstáculos por los malos caminos y leyes anacrónicas, además de la natural oposición de las empresas y particulares habituados al ferrocarril y los carruajes tirados por animales, por lo que hubo de esperar para su florecimiento hasta principios del siglo XX.

Como lo hemos vivido, al final del siglo XX, el transporte en el mundo experimenta importantes cambios, influenciando grandemente la población y tratando de adaptarse al crecimiento de la economía mundial, a la globalización y al acelerado desarrollo de la informática.

Los nuevos sistemas de transporte del siglo XXI, deberán ser seguros, eficientes, integrados y en especial ambientalmente sostenibles. Pero el automóvil como medio de transporte estará cuestionado, pues si se sigue con ese aumento tan vertiginoso, para atender a unos pocos usuarios, será necesario tener más calles y carreteras, que finalmente terminarán saturadas y ya no habrá espacio para más. Es aquí donde la solución que se nos avecina son los sistemas integrados de transporte público, que traten de sustituir los actuales sistemas privados, fortaleciendo el uso de la bicicleta y las zonas peatonales en núcleos urbanos. Se hará más uso de la electricidad, la electrónica y los sistemas satelitales, y posiblemente el transporte ya no será de superficie sino elevado.

En cuanto al automóvil, como medio de transporte, su tecnología se apoyará en la disminución del consumo de combustible, reducción de emisiones contaminantes, más confortables, más seguros y más económicos, haciendo uso de la llamada inteligencia artificial y la simulación por computador para tener modelos más aerodinámicos que ofrezcan menos resistencia al aire, con trazos mucho más curvilíneos y más livianos.

Volviendo a lo que se dijo en un principio: aceptemos que el hombre apareció en la tierra hace unos 100,000 años; que hasta hace sólo unos 10,000 años conoció la agricultura y que desde hace 6,000 años estableció los primeros centros de civilización. Si se va imaginado una línea recta en la que, a escala conveniente, se representen 100,000 años divididos en diez partes, habrá que hacer la primera marca donde empieza la décima división, del lado derecho, indicando 10,000 años, o sea la aparición de la agricultura. A corta distancia, a 6/100 del extremo derecho, se colocará otra marca para indicar 6,000 años del establecimiento de las primeras civilizaciones. A la mitad de la distancia entre la aparición de la agricultura y la época actual, es decir, a 5/100 del extremo derecho, se pondrá una raya indicando la aparición de la rueda, hace aproximadamente 5,000 años. Se sigue así y al final de la escala, en una fracción casi imperceptible como 9/10,000, se tendrá que marcar la aparición del vehículo de combustión interna tal como existe ahora...*hace tan sólo 90 y tantos años.* Por lo tanto, se puede concluir que el vehículo es un juguete novedoso que se acaba de incorporar a nuestra vida diaria.

Referencias bibliográficas

[1] Cal y Mayor, Rafael y Cárdenas, James. *Ingeniería de Tránsito: Fundamentos y Aplicaciones.* Séptima edición, Alfaomega Grupo Editor, México, D.F., 1994.

[2] American Association of State Highway Officials. *Public Roads of the Past.* The First Roadbuilders, página 9, 1952.

[3] Parkinson, Northcote C. *El Este Contra el Oeste.* Círculo de Lectores, S.A., Barcelona, 1973.

[4] Secretaría General de Obras, Comisión de Vialidad y Transporte Urbano, Sistema Metropolitano de Transporte, Departamento del Distrito Federal. *Crecimiento de Puesta en Operación de Redes de Ferrocarriles Urbanos.* Construcción del Metro, No. 7, Ciudad de México, Abril 1993.

2

Problema del tránsito y su solución

2.1 Trazo de las carreteras y calles en uso

Los constructores contemporáneos de carreteras son "descendientes" y hechura de los ingenieros de ferrocarriles. Estos estaban interesados principalmente en tender una base para los rieles, sabiendo que el movimiento de trenes sería controlado con señales y que los conductores serían disciplinados en cuanto a la violación de las reglas. La intención de los primeros constructores de carreteras destinadas a vehículos de combustión interna, era la de proporcionar una buena superficie de rodamiento. La actitud de muchos de ellos, puede resumirse en lo siguiente: *nosotros les proporcionamos una carretera con superficie lisa; si el automovilista es lo suficientemente insensato para matarse uno al otro, eso es cosa de él y no del proyectista de la carretera.*

La mayoría de las carreteras y calles del mundo están trazadas siguiendo las rutas de las diligencias y es común observar que las velocidades de proyecto son superadas por las de los vehículos que actualmente las transitan. Sus características de curvatura, pendiente, sección transversal y capacidad de carga, corresponden, más bien, a un tránsito de vehículos lentos, pequeños y ligeros, como lo eran los vehículos tirados por animales y los primeros automóviles.

Muchas carreteras y calles actuales quedarían mal relacionadas al compararlas con los caminos del Imperio Romano...y en aquel entonces no existían los vehículos de ahora. Además, buena parte de las carreteras y calles consideradas de la *Era Motorizada*, fueron proyectadas para los vehículos de hace 50 ó 60 años, y en ese lapso el vehículo de motor ha variado tanto, que ya esas carreteras resultan anticuadas y las calles, en ciertos casos, de acuerdo a su clasificación funcional y jerarquía para una mayor circulación vehicular, podrían también ser obsoletas.

Hace 60 años se proyectaba una carretera con velocidad de proyecto de 60 km/h y se consideraba avanzada; actualmente se considera conservadora una velocidad de 100 km/h para hacer frente a las altas velocidades desarrolladas.

2.2 Trazo urbano actual

Considérese ahora el trazo de nuestras ciudades; no porque se haga de hecho una simple diferenciación entre carretera y calle, ya que se sabe que la una es continuación de la otra, sino que las variables de entorno y la existencia de personas que interactúan y usan la calle como espacio público, hacen la diferencia, lo cual define condiciones especiales para el desplazamiento vehicular en las ciudades.

La actual conformación urbana de las áreas centrales corresponde a la de una ciudad antigua crecida; a un patrón de cuadrícula rectangular, multiplicada. Los planos de la figura 2.1 muestran esquemáticamente tal correspondencia, entre el trazo de la ciudad antigua de Pompeya y el trazo actual de la Ciudad Juárez, México. Este trazo es el que data de cientos de años antes de la Era Cristiana, cuando sólo había vehículos tirados por animales y cabalgaduras. Hoy, se insiste en cometer el error de conservar las calles angostas, el trazo rectangular, trazo...para cabalgaduras, no para la *Era Motorizada.*

Casi todo intento de reforma urbanística ha sido derrotado por intereses creados y ceguera de particulares y autoridades. Pero además de eso, cuando se han proyectado nuevas ciudades o nuevas secciones urbanas, especialmente en el Nuevo Mundo, no se ha dudado mucho en concebirlas... ¡sobre la misma base de la cuadrícula rectangular! En cualquiera de las ciudades del mundo, el vehículo moderno es para las autopistas y facilidades expresas donde se puede desplazar a grandes velocidades y los cruces son a desnivel. En tal sentido, se tiene presente la seguridad de los habitantes y se prevén los accidentes fatales. Desde otro punto de vista, decir que el automóvil puede desplazarse a grandes velocidades por toda la ciudad, es anacrónico...no cabe...está *fuera del momento histórico actual,* donde se busca sistemas de transporte amigables en espacios urbanos dinámicos donde también se da prioridad al peatón, al ciclista y al transporte público. En consecuencia, es necesario compatibilizar en el diseño vial, la velocidad de operación de los vehículos con la jerarquía y función del sistema vial urbano.

2.3 Progreso del vehículo de motor

En 1875, *Siegfred Marcus* (1831-1898) en Viena, conduce un automóvil de gasolina [1]. En 1876, *Nicolás A. Otto*, de Alemania, desarrolla la idea de comprimir el combustible en forma de gas, antes de la explosión. Su proyecto básico del motor de cuatro tiempos tiene actualmente uso mundial. En 1878, se registró en Estados Unidos la primera patente para un motor de gasolina. En 1887, *Gottlieb Daimler*, en Alemania, fabrica su primer automóvil. En 1888 la *Connelly Motor Company*, de Nueva York, puso en venta sus productos, siguiéndole los automóviles *Daimler* y *Duryea* en 1891 y 1892 [2]. En 1894 se corre la primera carrera automovilística entre París y Rouen, Francia. En 1895 se celebró la carrera de 100 millas entre Chicago y Libertyville, EE. UU., ganando Duryea con velocidad promedio de 13 km/h. En ese año existían en Estados Unidos tan sólo 4 vehículos; [2] en 1896 habían ya 16 automóviles; en 1900 llegó a 8,000 y para 1910 el número se había elevado a 468,500 vehículos.

Figura 2.1 Trazo de las ciudades antigua y actual

En 1898 entró a México el primer automóvil [3]. El auto era francés, marca *Delaunay Belleville*, hecho a mano en las fábricas de Curvier, en Tolón. De 3 que llegaron ese año a la población de El Paso, Texas, éste fue adquirido por el millonario Manuel Cuesta y llevado a Guadalajara. El que lo condujo, Andrés Sierra González, lo registró como el automóvil número 1, en Monterrey, N.L. el mismo año.

Cabe hacer notar la enorme influencia que tuvo la Primera Guerra Mundial en el desarrollo del vehículo de combustión interna. Fue notable la ventaja que militares y civiles observaron en el vehículo automotor, por lo que se dio rienda suelta a la producción.

El impacto que recibió este medio de transporte puede verse claramente en el incremento tan extraordinario que ha tenido el número de vehículos a través de los años, según lo muestra la tabla 2.1, considerando el total de vehículos, que incluye automóviles, autobuses y camiones.

Tabla 2.1 Aumento de vehículos a través de los años (automóviles + autobuses + camiones)

Años	México	Estados Unidos	Total en el Mundo
1895	-	4	-
1896	-	16	-
1897	-	90	-
1898	1	800	-
1899	-	3,200	-
1900	-	8,000	-
1910	-	468,500	-
1920	-	9,239,161	-
1924	42,858	17,612,940	-
1930	87,665	26,531,999	-
1940	145,708	32,453,233	45,422,411
1950	302,798	49,161,691	63,200,500
1960	802,630	73,901,500	121,541,265
1970	1,773,868	105,096,603	226,167,572
1979	5,683,484	148,778,235	364,443,491
1989	7,795,000	183,468,000	536,278,520
1990	10,165,715	193,057,376	553,321,114
1995	11,961,930	205,427,212	632,277,569
1996	12,395,935	210,441,249	648,321,111
1997	13,245,240	211,580,033	664,271,005
1998	14,278,739	215,496,003	681,423,211
1999	15,126,784	220,461,056	697,097,998
2000	16,508,142	225,821,241	712,871,123
2001	18,337,659	235,331,381	727,144,465
2002	20,049,318	234,624,135	744,543,534
2003	21,238,641	236,760,033	760,323,251

Fuente: Institute of Traffic Engineers. *Traffic Engineering Handbook*. 1950.
Rojas Gonzalez, Guillermo. *"Colorí"*, Periódico *"Policía"*. 1955.
Automóvil Internacional. *Censo Mundial de Automotores*. 1989.
INEGI. *Síntesis Metodológica de las Estadísticas de Vehículos de Motor*. 2003.

Como puede observarse en la tabla, en 1898 se registraba el primer vehículo en México, mientras que en Estados Unidos ya se contaba con 800 vehículos. A partir de

1940 se tienen registros comparativos con el total en el mundo, marcando en este año para México 145,708 vehículos, para Estados Unidos 32,453,233 vehículos y para todo el mundo 45,422,411 vehículos. Ya en el año 2003, se registraron en el mundo un total de 760,323,251 vehículos, correspondiéndole a México 21,238,641 vehículos (el 2.79 %) y a Estados Unidos 236,760,033 vehículos (el 31.14 %).

Durante los últimos 90 años, prácticamente desde 1910, el vehículo de motor por su incremento vertiginoso ha experimentado cambios extraordinarios. Inició su vida siendo un artefacto de lujo y deporte, al que no se le daba mayor importancia; del que nadie imaginaba que llegaría a influir tanto en la economía del transporte.

Los cambios principales que ha sufrido el vehículo de motor son básicamente los de su potencia, velocidad y comodidad. A través de ese período, la potencia del motor de gasolina se ha incrementado en una relación aproximada de 1 a 10. Naturalmente, aunada a esta potencia, el vehículo ha adquirido mayor capacidad de carga. Sin embargo, la producción de automóviles pequeños se ha incrementado y la demanda de espacio vial, por la mayor cantidad de automóviles, ha aumentado; así mismo, los vehículos de transporte público y los de carga han incrementado sus dimensiones. En la actualidad un gran porcentaje de la carga es movida en camiones y una proporción importante de pasajeros son transportados en autobuses y automóviles. La velocidad de estos vehículos también ha variado extraordinariamente. Si se recuerda que en 1895 la carrera automovilística entre Chicago y Libertyville fue ganada con un promedio de velocidad de 13 kilómetros por hora, se verá el cambio si se la compara con el promedio de velocidad de los ganadores de este tipo de justas deportivas en los últimos tiempos, con 250 y 350 kilómetros por hora, como es el caso de la *Fórmula 1*. Tan sólo considerando las velocidades que desarrollan los modernos automóviles catalogados estándar, se ve que sus viajes normales pueden realizarse a la velocidad de 120 kilómetros por hora, cuando no hay limitaciones por parte de la carretera.

En comodidad, los vehículos han evolucionado para convertirse de un vehículo frágil, ruidoso, humeante y saltarín, en una prolongación del sofá del hogar en el que, cómodamente sentado, sin ruidos y sin fatiga, el usuario recorre cientos de kilómetros en una jornada.

Y finalmente, se puede decir que el vehículo no solamente ha llegado al grado de las altas velocidades conocidas actualmente y de la enorme potencia de su motor, sino que ese cambio se sigue sucediendo año con año y no se ve fin a su interminable evolución. Con tal consideración, la canalización del vehículo debe ser adecuadamente planteada en el funcionamiento del sistema vial con la finalidad de lograr equilibrio entre la velocidad, la seguridad y la calidad ambiental, principalmente en las ciudades.

2.4 Relación entre la demanda vehicular y la oferta vial

Con el propósito de entender los problemas de tránsito, es importante realizar una interpretación de manera gráfica de los dos elementos que la originan: la demanda vehicular y la oferta vial.

La *demanda vehicular* es la cantidad de vehículos que requieren desplazarse por un determinado sistema vial u *oferta vial*. Se entiende que dentro de la *demanda vehicular* se encuentran aquellos vehículos que están circulando sobre el sistema vial, los que se encuentran en cola esperando circular (en el caso de existir problemas de congestión) y los que deciden tomar rutas alternas (para evitar la congestión, si existe). Para observar si la operación vehicular se da en condiciones de flujo estable o saturado, es necesario comparar estos dos elementos. Para tal efecto, ellos se deben expresar en las mismas unidades, por lo que la oferta vial, que representa el espacio físico (calles y carreteras), se puede indicar en términos de su sección transversal o capacidad. De esta manera, la *oferta vial* o *capacidad* representa la cantidad máxima de vehículos que finalmente pueden desplazarse o circular en dicho espacio físico.

2.4.1 Patrón urbano

En la figura 2.2, se ilustra en forma de esquema una parte de una zona urbana, donde se identifican la *demanda vehicular* (los vehículos) y la *oferta vial* (las calles).

Figura 2.2 *Patrón urbano de demanda vehicular y oferta vial*

La demanda es generada por los vehículos que circulan y los que acceden a los lotes adyacentes a las calles según su densidad de edificación. La oferta vial es caracterizada por su capacidad con base en el número de carriles y las velocidades de desplazamiento.

Si *Demanda Vehicular* < *Oferta Vial*, el flujo será no saturado y los niveles de operación variarán de excelentes a aceptables. Es lo deseable.

Si *Demanda Vehicular* = *Oferta Vial*, se llega a la capacidad del sistema. El tránsito se torna inestable y se puede llegar a la congestión.

Si *Demanda Vehicular* > *Oferta Vial*, el flujo será forzado, presentándose detenciones frecuentes y grandes demoras. Es lo no deseable.

Por lo tanto, si *Demanda Vehicular* ≤ *Oferta Vial*, no existirá mayor problema en el manejo del tránsito. Por el contrario, si *Demanda Vehicular* > *Oferta Vial*, se presentarán los problemas de tránsito, que habrá que analizar y resolver.

En la figura 2.3, se muestra de manera gráfica, la variación de la demanda vehicular (q) a través de las horas del día en una sección transversal de una calle comparada con su capacidad (c).

Figura 2.3 *Comparación entre la demanda vehicular y la oferta vial en una zona urbana*

2.4.2 Patrón rural

En la figura 2.4, se ilustran en forma de esquema los sistemas viales rurales, correspondientes a las carreteras de dos carriles y a las carreteras de carriles múltiples, donde también se identifican la *demanda vehicular* (los vehículos) y la *oferta vial* (las carreteras).

Figura 2.4 *Patrón rural de demanda vehicular y oferta vial*

A su vez, en la figura 2.5, se muestra de manera gráfica la demanda histórica en una sección transversal de una carretera, representada en los volúmenes vehiculares año tras año. Dicha demanda histórica puede ser utilizada para realizar los pronósticos de la demanda vehicular futura (q), de tal manera que se podrá comparar con la capacidad vial (c) disponible.

2.5 Factores que intervienen en el problema del tránsito

Las ciudades dependen grandemente de sus sistemas de calles, ofreciendo servicios de transporte. Muchas veces, estos sistemas tienen que operar por arriba de su capacidad, con el fin de satisfacer los incrementos de demanda por servicios de transporte, ya sea para tránsito de vehículos livianos, tránsito comercial, transporte público, acceso a las distintas propiedades o estacionamientos, etc., originando obviamente problemas de tránsito, cuya severidad por lo general se puede medir en términos de accidentes y congestionamiento.

Figura 2.5 *Comparación entre la demanda vehicular y la oferta vial en una zona rural*

A pesar de que en los últimos tiempos con los avances tecnológicos, se han logrado proyectar y construir sistemas viales más acordes con el entorno urbano de las áreas adyacentes y a los requerimientos operacionales de los vehículos que los utilizan, al igual que diseños urbanos consistentes con los requerimientos del tránsito vehicular, de peatones, carga, transporte público y usos del suelo urbano; los problemas de tránsito en muchos lugares aún persisten. A continuación se enuncian cinco factores que podrían ser los contribuyentes a estos problemas y que deben ser tomados en cuenta en cualquier intento de solucionarlos:

1. *Diferentes tipos de vehículos en la misma vialidad*

- Diferentes dimensiones, velocidades y características de aceleración.
- Automóviles diversos.
- Camiones y autobuses, de alta velocidad.
- Camiones pesados, de baja velocidad, incluyendo remolques.
- Vehículos tirados por animales, que aún subsisten en algunos países.
- Motocicletas, bicicletas, vehículos de mano, etc.

2. *Superposición del tránsito motorizado en vialidades inadecuadas*

- Relativamente pocos cambios en el trazo urbano.
- Calles angostas, torcidas y pendientes pronunciadas.

- Aceras insuficientes.
- Carreteras que no han evolucionado.

3. Falta de planificación en el tránsito

- Calles, carreteras y puentes que se siguen construyendo con especificaciones inadecuadas a las características funcionales, rol, clasificación y calificación de las nuevas vialidades, obras de infraestructura (tal como puentes, túneles, etc.) y otros.
- Intersecciones proyectadas con una mala concepción, desarrolladas e implementadas sin base técnica.
- Inadecuada política de estacionamiento, con la carencia de una estrategia que permita prever espacios para estacionamiento, coherente con los lineamientos preestablecidos.
- Incoherencia en la localización de zonas residenciales en relación con el funcionamiento de las zonas industriales o comerciales.

4. El automóvil no considerado como una necesidad pública

- Falta de percepción y criterio objetivo en la apreciación de las autoridades sobre la necesidad del vehículo dentro de la economía del transporte.
- Falta de ponderación en la apreciación del público en general a la importancia del vehículo automotor.

5. Falta de asimilación por parte del gobierno y del usuario

- Legislación y reglamentos del tránsito anacrónicos que tienden más a forzar al usuario a asimilar el uso de los mismos, que adaptarse a las necesidades del usuario.
- Falta de educación vial del conductor, del pasajero y del peatón.

2.6 Tipos de solución

Si el problema del tránsito causa pérdida de vidas y bienes, o sea que equivale a una situación de falta de seguridad para las personas y de ineficiencia económica del transporte, la solución, lógicamente, se obtendrá haciendo el tránsito seguro y eficiente.

Hay tres tipos de solución que se pueden dar al problema del tránsito:

1. Solución integral

Si el problema es causado por un vehículo moderno sobre carreteras y calles antiguas, la solución integral consistirá en construir nuevos tipos de vialidades que sirvan a este vehículo, dentro de la previsión posible. Se necesitará crear ciudades

con trazo nuevo, revolucionario, con calles destinadas al desplazamiento del vehículo moderno, con todas las características inherentes al mismo.

La figura 2.6 ilustra en forma esquemática el trazo propuesto para nuevas ciudades, el cual se inspira en los sistemas circulatorios de la naturaleza, como el de la sangre en el hombre, el de los ríos y el de las plantas. En este proyecto se busca el equilibrio de la oferta y la demanda con el trazo de arterias troncales con control de accesos para facilitar el viaje al centroide, con calles secundarias que drenan las zonas de habitación y trabajo hacia el lógico desfogue que las lleve a las zonas centroidales.

Esta solución es casi imposible de aplicar en las ciudades actuales, por el alto costo que ello significa, ya que se tendría que reestructurar el sistema vial y el de los edificios y se necesitaría empezar por eliminar casi todo lo existente, llevándose a cabo una renovación urbana total. Las carreteras y calles actuales tendrían que ser sustituidas por otras cuya velocidad de proyecto fuese, por ejemplo, de 130 kilómetros por hora o más.

2. *Solución parcial de alto costo*

Esta solución equivale a sacar el mejor partido posible de lo que actualmente se tiene, con ciertos cambios necesarios que requieren fuertes inversiones. Los casos críticos, como calles angostas, cruceros peligrosos, obstrucciones naturales, capacidad restringida, falta de control en la circulación, etc., pueden atacarse mediante la inversión necesaria que es, siempre, muy elevada. Entre las medidas que pueden tomarse están: el ensanchamiento de calles, modificación de intersecciones rotatorias, creación de intersecciones canalizadas, sistemas de control automático con semáforos, estacionamientos públicos y privados, etc.

Las fotografías de la figura 2.7 ilustran tipos de soluciones parciales de alto costo.

3. *Solución parcial de bajo costo*

Consiste en el aprovechamiento máximo de las condiciones existentes, con el mínimo de obra material y el máximo en cuanto a regulación funcional del tránsito, a través de técnica depurada, así como disciplina y educación por parte del usuario, y a la coherente localización de actividades con respecto al patrón de usos del suelo y a las características físicas del sistema vial de acceso. Incluye, entre otras cosas, la legislación y reglamentación adaptadas a las necesidades del tránsito; las medidas necesarias de educación vial; la organización del sistema de calles con circulación en un sentido; el estacionamiento de tiempo limitado; el proyecto específico y apropiado de señales de tránsito y semáforos; la canalización del tránsito a bajo costo; la priorización y eficiente organización del transporte público, de calles y aceras peatonales; así como, las facilidades para la construcción de terminales y estacionamientos; etc.

Figura 2.6 *Trazo propuesto para nuevas ciudades*

Figura 2.7 Tipos de soluciones parciales de alto costo

La fotografía de la figura 2.8 muestra una solución parcial de bajo costo, consistente en una intersección a nivel, donde se observa la vuelta a la izquierda canalizada y la calle arterial con circulación en un solo sentido aumentando de manera importante la capacidad al disponer de mayor número de carriles.

Figura 2.8 Solución parcial de bajo costo

2.7 Bases para una solución

De cualquier manera, la experiencia demuestra que en determinado tipo de solución deberán existir tres bases en que se apoye la misma. Son los tres elementos que, trabajando simultáneamente, van a dar lo que se quiere: un tránsito seguro y eficiente. Estos tres elementos son:

1. ***La ingeniería de tránsito***
2. ***La educación vial***
3. ***La legislación y vigilancia policíaca***

Aquel medio en el que falta alguno de estos tres elementos, también llamados columnas del *Templo de la Seguridad*, no tendrá un tránsito exento de accidentes y de congestionamientos. Es necesario que, cualquiera que sea el tipo de solución que se adopte, tome en cuenta estas tres herramientas indispensables. Es esencial que un técnico *especializado en ingeniería de tránsito* resuelva los problemas del proyecto físico de la carretera o calle con todos sus detalles; que las instituciones educativas y el

gobierno tomen por su cuenta la preparación del individuo para la era motorizada en que vive y, finalmente, que las autoridades sepan crear leyes y reglamentos adaptados a las necesidades del tránsito moderno y que las hagan cumplir por medio de agentes de tránsito especialmente preparados para tal fin.

Las fotografías de la figura 2.9 enseñan los tres elementos bases para una solución: la superior la *ingeniería de tránsito*, la del medio la *educación vial* y la inferior la *legislación y vigilancia policíaca*.

2.8 Metodología

Para atacar este problema, se deben seguir seis pasos sucesivos que permitirán el planteamiento del mismo, de tal manera que la solución sea lógica y práctica. Los seis pasos necesarios son los siguientes:

1. ***Observación de la problemática***
2. ***Formulación de hipótesis de la problemática y su solución***
3. ***Recopilación de datos***
4. ***Análisis de los datos***
5. ***Proposición concreta y detallada***
6. ***Estudio de los resultados obtenidos***

Como primer paso se requiere tomar contacto directo con el área física del problema, tal que se defina la información indispensable a reunir, con base en una buena formulación del marco de hipótesis. En la recopilación de datos, lo que se necesitan son precisamente las estadísticas, los informes oficiales y los hechos veraces. No es suficientemente útil conocer la opinión del amigo o del comerciante de la esquina; se necesitan datos estadísticos obtenidos oficialmente, en el lugar de los accidentes u obtenidos de fuentes de información dignas de crédito.

Segundo, para el análisis de estos datos se necesita una mente entrenada que pueda dar una interpretación real a los mismos. De estos análisis se desprende una parte muy importante de la solución y sólo un especialista en la materia deberá llevarlo a cabo.

Después del análisis, el encargado de resolver el problema deberá presentar un proyecto de solución, cubriendo los tres elementos básicos. Incluyendo el aspecto físico y el uso del suelo en el entorno urbanístico en caso de calles urbanas, adaptando las características del vehículo y el comportamiento del usuario, a las modalidades necesarias que el proyecto requiere en cuanto a educación vial, así como las reformas y sistemas legislativos y policíacos, que coadyuven a implementar la solución.

Finalmente, es conveniente observar, durante cierto período posterior, el resultado que tuvo la solución aplicada. Este resultado se observará directamente a través de las estadísticas levantadas en cuanto a la eficiencia del movimiento vehicular y de peatones, así como en cuanto a la disminución o aumento de accidentes. Es posible que muchas soluciones requieran una revisión y perfeccionamiento, por lo que este último paso es de gran importancia.

Figura 2.9 Los tres elementos bases para una solución al problema del tránsito: la ingeniería de tránsito, la educación vial y la legislación y vigilancia policíaca

2.9 Especialización

¿Pero, quién es ese técnico especializado que se encargará de enfrentarse a este problema; de saber qué datos buscar; de poder analizarlos y, finalmente, encontrar una solución atinada? Definitivamente no lo ha sido el Ingeniero Civil, preocupado principalmente por la parte estructural de sus obras, ni lo han sido tampoco el Arquitecto, ni el Urbanista, ni el Ingeniero de Vías Terrestres, ni el Ingeniero Municipal. Como consecuencia del mismo problema, ha surgido una nueva especialización de la ingeniería; aquella a la que concierne específicamente el aspecto funcional de la vialidad, la que tiene que ver con el movimiento de vehículos y peatones, es la *Ingeniería de Tránsito*.

Desafortunadamente, los técnicos preparados en esta materia son muy contados y sólo hasta hace algunos años las instituciones educacionales de algunos países se han empezado a preocupar por formarlos.

Es el *Ingeniero de Tránsito* el capacitado específicamente para recolectar y analizar los datos del problema y buscar la solución más adecuada; es el que llevará la responsabilidad de ahora en adelante. He ahí pues su reto.

La administración de las funciones de gobierno con respecto al tránsito de vehículos es una parte importante del arte de gobernar. El objetivo en la administración del tránsito es mantener la red vial en operación; hacer posible que se muevan las personas y los vehículos y permitir que todo el que quiera se traslade y desarrolle sus actividades en forma eficiente. Muchos administradores públicos reconocen ya la necesidad de aplicar la Ingeniería de Tránsito; muchos se dan cuenta que la necesitan pero no saben cómo, o no pueden conseguirla. Otros, no saben aún qué es y no se imaginan cómo puede servirles. Sobre todo se manifiesta la necesidad de esta nueva tecnología en aquellas redes viales, urbanas o rurales, donde los volúmenes de tránsito han crecido y se tienen problemas de accidentes y congestionamientos. Las dos principales razones por las que no todos los países han incorporado un tratamiento técnico a sus problemas de tránsito y transportes son la falta de conocimientos sobre la materia y la falta de medios económicos.

Los ingenieros de tránsito han podido demostrar la conveniencia de emplear simultáneamente la vigilancia, la educación y la ingeniería de tránsito en el logro de la meta de un tránsito seguro y eficiente. Ellos han obtenido la debida evaluación de la Ingeniería de Tránsito como uno de los elementos indispensables para ese fin. Muchos años de experiencias, de pruebas y errores han eliminado toda duda de que el tratamiento al problema del tránsito requiere de la ingeniería tanto como de la vigilancia y de la educación, y que si no la aplicamos nuestro programa estará incompleto.

La mejor manera de utilizar la ingeniería de tránsito consiste en estructurar planes adecuados, prácticos y bien meditados para mejorar la seguridad y la fluidez del tránsito, sobre todo en áreas críticas, donde la interacción con otras disciplinas es fundamental. Especialmente es necesaria la aplicación de la ingeniería de tránsito, con enfoque interdisciplinario, en los grandes proyectos de vialidad, cuando se trata de construir sistemas arteriales de altas especificaciones, como autopistas urbanas. Pero también es

indispensable para lograr abatir la incidencia de accidentes en un crucero conflictivo o en una arteria peligrosa. Por lo general, ya no bastan las medidas educativas o policíacas, pues en muchos casos se requiere ya de una remodelación física del crucero y del entorno, o de la utilización óptima de dispositivos de control. La canalización mediante isletas, la supresión de obstáculos, u obras mayores, como pasos a desnivel, requieren de la más avanzada ingeniería de tránsito. La instalación de semáforos y señales y la programación de aquélios, respondiendo a las necesidades y a las características específicas del lugar, requieren de la técnica especializada.

En los países desarrollados, los nuevos dispositivos de control introducidos, desde la simple señal de ALTO y los primeros semáforos manuales, empezaron a ordenar el movimiento de los vehículos en los centros urbanos. Conforme el tránsito se volvía más complicado, aumentó el interés por mejorar la red vial y los dispositivos de control. No solamente se logró mantener en movimiento la ciudad y los sistemas de carreteras, sino que el tránsito se hizo más ordenado y menos riesgoso. Al organizarse las dependencias como Direcciones, Departamentos o Comisiones de Tránsito, con estructura técnica y no policíaca, se dio un gran paso hacia adelante. Si bien es cierto que las oficinas técnicas originalmente estuvieron ubicadas en la organización policíaca, pronto se hizo necesario separarlas, ya que sus funciones, aunque complementarias, son distintas.

Una parte fundamental de las aplicaciones de la ingeniería a los problemas de la circulación, es el beneficio en vidas y bienes ahorrados, además de las importantes ganancias económicas. En esto último no solamente cuentan las horas-hombre ahorradas al suprimir el nudo vial o al construir una vía alterna de alivio, sino los ingresos que produce la organización mecanizada y racional del control de vehículos y de conductores; la aplicación estricta de un reglamento enfocado a aumentar la seguridad y los ingresos producidos por estacionamientos y parquímetros de la ciudad.

Toda Dirección de Ingeniería de Tránsito ha tenido un comienzo modesto y difícil. Unos comenzaron con un pequeño taller de semáforos y señales; otros empezaron con un equipo humano lleno de deseos de trabajar y muy poco presupuesto. En cambio, otros han empezado con un sólo ingeniero, quizás ayudado por una secretaria y un dibujante. Las funciones básicas que han sido cubiertas por estos departamentos especializados son, principalmente: planeación, recopilación de datos, análisis y evaluaciones, proyectos, dispositivos de control, estacionamientos, transporte público, obras por contrato y talleres. Se empezó con modestos estudios de volúmenes de tránsito, de estacionamiento y de semáforos. Con la instalación de los primeros dispositivos de control, se creó la necesidad de una oficina o grupo de personas que se hiciera cargo de ellos. Posteriormente se le dio a esa entidad otra jerarquía mayor, y así fueron creciendo. Ahora, muchas de esas oficinas, de origen modesto, tienen un rango semejante a las Direcciones de Obras Públicas, de Planificación y de Seguridad Pública.

La aceptación que ha tenido la Ingeniería de Tránsito a través de los resultados obtenidos en múltiples aplicaciones y, el alarmante saldo adverso que se presenta por pérdidas de vida y bienes en la vialidad, justifican, con creces, la atención que se le dé a esta nueva tecnología.

Referencias bibliográficas

[1] American Association of State Highway Officials. *Public Roads of the Past*. The First Roadbuilders, página 9, 1952.

[2] Institute of Traffic Engineers. *Traffic Engineering Handbook*. New Haven, Conn., 1950.

[3] Rojas, González, Guillermo. *"Coloril"*, Periódico *"Policía"*. 1955.

3

Transporte e ingeniería de tránsito

3.1 Generalidades

Este capítulo tiene como propósito ubicar la *Ingeniería de Tránsito* dentro del contexto de la *Ingeniería de Transporte*, puesto que el tránsito es una fase o parte del transporte. No se trata de realizar una presentación exhaustiva del transporte, pero sí conceptuar de una manera muy general y clara sobre su estructura básica y sus sistemas y modos, para finalmente arribar a los alcances de la ingeniería de tránsito como tal.

Los dos capítulos anteriores, antecedentes históricos del transporte y el problema del tránsito, certifican que el transporte ha jugado un papel muy importante en el desarrollo de las civilizaciones antigua y moderna. En la medida en que la sociedad se ha venido tornando más compleja, se ha incrementado la *necesidad* de unir las distintas actividades que se llevan a cabo en lugares separados -orígenes y destinos- en busca de una *utilidad* o *beneficio*, mediante el transporte de personas y mercancías sobre diversos medios de comunicación. El transporte es útil en dos aspectos: utilidad de *lugar* y utilidad de *tiempo*; términos económicos que significan contar con los pasajeros o mercancías en un lugar específico en el momento oportuno. El éxito en satisfacer esta necesidad, ha sido y será uno de los principales contribuyentes en la elevación del nivel de vida de las sociedades de todos los países del mundo.

La velocidad, el costo y la capacidad del sistema de transporte disponible, tienen un impacto significativo en la vitalidad económica de una región y en la habilidad en el uso de sus recursos naturales. Las sociedades más desarrolladas e industrializadas se distinguen por poseer servicios de transporte de alta calidad.

Si determinada área, urbana o rural, desea crecer y prosperar, será necesario planear, estudiar, proyectar, construir, operar, conservar y administrar nuevos sistemas lo suficientemente amplios, tanto para el transporte público como privado, que permitan conectar e integrar las actividades que se desarrollan en los diferentes lugares de la región, mediante la movilización de personas y mercancías. Estos sistemas, al igual que los recursos existentes, deberán ser manejados de tal manera que se produzca el máximo flujo libre en el tránsito. Aún más, si se desea mantener un nivel de amenidad más o menos razonable, los nuevos sistemas deberán ser planeados manteniendo un uso

económico y eficiente del suelo, y a la vez contribuyan estéticamente al medio ambiente, tanto de los usuarios como de los circundantes.

Con estos *objetivos*, adoptados como los de la Ingeniería de Tránsito y Transporte, la actual sociedad está más que comprometida. Así, las entidades gubernamentales en todos sus niveles, las universidades y las compañías particulares están de una u otra manera respondiendo a estas necesidades, mediante la conformación de autoridades apropiadas, grupos de planeación, profesionales y oficinas de estudios e investigación.

3.2 Definiciones

Las cinco definiciones siguientes, que se han tomado del Diccionario de la Lengua de la Real Academia Española [1], sirven de base para entender el concepto tanto técnico como científico de la Ingeniería de Tránsito y Transporte:

- *Transportar*: "llevar una cosa de un paraje o lugar a otro. Llevar de una parte a otra por el porte o precio convenido".
- *Transporte o transportación:* "acción y efecto de transportar o transportarse".
- *Transitar:* "ir o pasar de un punto a otro por vías, calles o parajes públicos".
- *Tránsito:* "acción de transitar. Sitio por donde se pasa de un lugar a otro".
- *Tráfico:* "tránsito de personas y circulación de vehículos por calles, carreteras, caminos, etc.".

El Instituto de Ingenieros de Transporte, ITE [2], define la Ingeniería de Transporte y la Ingeniería de Tránsito de la siguiente manera:

- *Ingeniería de Transporte:* "aplicación de los principios tecnológicos y científicos a la planeación, al proyecto funcional, a la operación y a la administración de las diversas partes de cualquier modo de transporte, con el fin de proveer la movilización de personas y mercancías de una manera segura, rápida, confortable, conveniente, económica y compatible con el medio ambiente".
- *Ingeniería de Tránsito:* "aquella fase de la ingeniería de transporte que tiene que ver con la planeación, el proyecto geométrico y la operación del tránsito por calles y carreteras, sus redes, terminales, tierras adyacentes y su relación con otros modos de transporte".

Como puede verse, la Ingeniería de Tránsito es un subconjunto de la Ingeniería de Transporte, y a su vez el Proyecto Geométrico es una etapa de la Ingeniería de Tránsito. El *Proyecto Geométrico* de calles y carreteras [3], es el proceso de correlación entre sus elementos físicos y las características de operación de los vehículos, mediante el uso de las matemáticas, la física y la geometría. En este sentido, una calle o carretera queda

definida geométricamente por el proyecto de su eje en planta (alineamiento horizontal) y en perfil (alineamiento vertical), y por el proyecto de su sección transversal.

3.3 Sistema de transporte

3.3.1 Estructura del sistema de transporte

Según M. L. Manheim [4], el *análisis de sistemas de transporte* debe apoyarse en las dos premisas básicas siguientes:

- El sistema global de transporte de una región debe ser visto como un sistema multimodal simple.
- El análisis del sistema de transporte no puede separarse del análisis del sistema social, económico y político de la región.

Por lo tanto, en el análisis del *sistema global de transporte*, se deben considerar:

- Todos los modos de transporte.
- Todos los elementos del sistema de transporte: las personas y mercancías a ser transportadas; los vehículos en que son transportados; la red de infraestructura sobre la cual son movilizados los vehículos, los pasajeros y la carga, incluyendo las terminales y los puntos de transferencia.
- Todos los movimientos a través del sistema, incluyendo los flujos de pasajeros y mercancías desde todos los orígenes hasta todos los destinos.
- El viaje total, desde el punto de origen hasta el de su destino, en todos los modos y medios, para cada flujo específico.

El sistema de transporte de una región está estrechamente relacionado con su sistema socioeconómico. En efecto, el sistema de transporte usualmente afecta la manera en que los sistemas socioeconómicos crecen y cambian y, a su vez, las variaciones en los sistemas socioeconómicos generan cambios en el sistema de transporte.

En la figura 3.1, se ilustra esta relación con base en tres variables básicas:

- El sistema de *transporte T*.
- El sistema de *actividades A*, esto es, el patrón de actividades sociales y económicas que se desarrollan en la región.
- La estructura de *flujos F*, esto es, los orígenes, destinos, rutas y volúmenes de personas y carga que se mueven a través del sistema.

Figura 3.1 *Relación entre el sistema de transporte, el sistema de actividades y los flujos*
(Fuente: Manheim, Marvin L. *Fundamentals of Transportation Systems Analysis*)

En el diagrama se pueden identificar tres clases de relaciones entre las tres variables: la *relación 1* indica que los flujos *F* que se presentan en el sistema son el producto de las interacciones entre el sistema de transporte *T* y el sistema de actividades *A*. La *relación 2* señala que los flujos *F* causan cambios en el sistema de actividades *A* en el largo plazo, a través del patrón de servicios ofrecido y de los recursos consumidos en proveerlos. Y la *relación 3* advierte que los flujos *F* observados en el tiempo generan cambios en el sistema de transporte *T*, obligando a que los operadores y el gobierno desarrollen nuevos servicios de transporte o modifiquen los existentes.

En este marco del sistema global de transporte, se puede concluir, que la sociedad utiliza el transporte como un servicio (necesidades), que se presta mediante la unión de los múltiples lugares donde se llevan a cabo las distintas actividades (beneficios). Es así, como en cada lugar donde la civilización ha encontrado un uso del suelo, el transporte forma parte de la economía que encierra una región, una nación y, porqué no decirlo, el mundo entero.

Además, y tal como se expresa en la Publicación Técnica No.2 [5], del Instituto Mexicano del Transporte y la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, al considerar el *sistema integral del transporte*, éste, por sus características y funciones, concentra la participación de los intereses e ideologías de múltiples grupos. Usuarios, operadores y gobierno perciben al transporte e intervienen en él de diferentes maneras, de acuerdo a su muy particular posición e interpretación de la realidad. La situación se complica al reconocer que, coexisten subgrupos con distintos intereses y motivaciones.

Este mismo documento [5] plantea las tesis siguientes:

- ⇨ "El transporte está integrado al movimiento comercial, por lo que todos los proyectos de transporte deben tomar en cuenta esa integración hasta en los más mínimos detalles de su concepción y ejecución".

- "Cualquier proyecto de desarrollo e infraestructura, que sin duda tendrá una repercusión en la problemática y la operación del transporte, debe otorgar el debido valor a las realidades comerciales y debe atender los problemas de transporte que del proyecto emanen".

- "Cuando un proyecto de transporte surge en respuesta a necesidades comerciales o sociales bien definidas, es contraproducente el resultado operativo al que se llega, si en el afán por recortar costos de construcción, se reducen sus especificaciones técnicas".

La misión del transporte [6] se lleva a cabo mediante la provisión de redes compuestas por la siguiente estructura, esquematizada en la figura 3.2:

Figura 3.2 Estructura física básica del sistema de transporte

1. *Las conexiones o medios*

Son aquellas partes o elementos fijos, que conectan las terminales, sobre los cuales se desplazan las unidades transportadoras. Pueden ser de dos tipos:

- Conexiones físicas: carreteras, calles, rieles, ductos, rodillos y cables.
- Conexiones navegables: mares, ríos, el aire y el espacio.

2. *Las unidades transportadoras*

Son las unidades móviles en las que se desplazan las personas y las mercancías. Por ejemplo:

- Vehículos: automotores, trenes, aviones, embarcaciones y vehículos no motorizados.
- Cabinas, bandas, motobombas, la presión y la gravedad.

3. *Las terminales*

Son aquellos puntos donde el viaje o embarque comienza y termina, o donde tiene lugar un cambio de unidad transportadora o modo de transporte. Se tienen las siguientes terminales:

- *Grandes*: aeropuertos, puertos, terminales de autobuses y de carga, estaciones ferroviarias y estacionamientos en edificios.
- *Pequeñas*: plataformas de carga, paradas de autobuses y garajes residenciales.
- *Informales*: estacionamientos en la calle y zonas de carga.
- *Otras*: tanques de almacenamiento y depósitos.

3.3.2 Sistemas y modos de transporte

La mayoría de las actividades globales de transporte se llevan a cabo en *cinco grandes sistemas*: carretero, ferroviario, aéreo, acuático y de flujos continuos. Cada uno de ellos se divide en dos o más modos específicos, y se evalúan en términos de los siguientes tres atributos [6]:

1. *Ubicación*

Grado de accesibilidad al sistema, facilidad de rutas directas entre puntos extremos y facilidad para acomodar un tránsito variado.

2. *Movilidad*

Cantidad de tránsito que puede acomodar el sistema (capacidad) y la rapidez con la que éste se puede transportar.

3. *Eficiencia*

Relación entre los costos totales (directos más indirectos) del transporte y su productividad.

En la tabla 3.1 se presenta, en términos globales, los sistemas de transporte, sus medios, atributos, modos y el tipo de servicio que prestan.

Tabla 3.1 Sistema global de transporte

Sistema	Medio	Ubicación	Movilidad	Eficiencia	Modo	Servicio de pasajeros	Servicio de carga
Carretero	Carreteras y Calles	Muy alta. Acceso directo a la propiedad lateral. Rutas directas limitadas por la topografía y el uso del suelo.	Velocidades limitadas por factores humanos y controles. Baja capacidad vehicular, pero alta disponibilidad de vehículos.	No tan alta en términos de seguridad, energía y algunos costos.	Camión		Interurbano, local y rural, hacia centros de procesamiento y mercados. Cargas pequeñas y contenedores.
					Autobús	Interurbano y local.	Paquetes (interurbano).
					Automóvil	Interurbano y local.	Objetos personales.
					Bicicleta	Local y recreacional.	Insignificante.
Ferroviario	Rieles	Limitada por la alta inversión en la estructura de las rutas y por la topografía.	Mayor velocidad y capacidad que los modos por carretera.	Generalmente alta, pero los costos laborales pueden bajar la eficiencia.	Ferrocarril	Interurbano.	Interurbano. En volumen. Contenedores.
					Metro	Regional y urbano.	Ninguno.
Aéreo	Aire	Los costos aeroportuarios reducen la accesibilidad. Rutas completamente directas.	Las velocidades son las más altas, con capacidad vehicular limitada.	Moderadamente baja en términos de energía y costos de operación.	Aviación comercial	Interurbano a grandes distancias Transoceánico.	Mercancías de alto valor. Contenedores.
					Aviación general	Interurbano, recreacional y de negocios.	Poco.
Acuático	Mares y Ríos	Rutas directas. Accesibilidad limitada por la disponibilidad de mares y ríos navegables y puertos seguros.	Baja velocidad. Capacidad muy alta por vehículo.	Muy alta por los bajos costos y poco consumo de energía. La seguridad es variable.	Barcos	Tránsito de crucero.	En volumen (petróleo). Contenedores.
					Cabotaje y Fluvial	Transbordos en lanchas y barcazas.	Volúmenes medianos de carga.
Flujos Continuos	Ductos Rodillos Cables	Limitada a pocas rutas y puntos de acceso.	Bajas velocidades. Alta capacidad.	Generalmente alta. Bajos costos por consumo de energía.	Ductos	Ninguno.	Líquidos y gases.
					Bandas	Escaleras y bandas a nivel.	Manejo de materiales.
					Cables	Transporte en cabinas.	Manejo de materiales.

Fuente: Adaptada de Homburger, W.S. *Fundamentals of Traffic Engineering.* 15th edition, University of California, Berkeley, 2000.

3.4 Alcances de la ingeniería de tránsito

Definido de esta manera el marco de referencia de la Ingeniería de Tránsito, en esta importante rama se analiza en forma pormenorizada lo siguiente:

1. Características del tránsito

Se analizan los diversos factores y las limitaciones de los vehículos y los usuarios como elementos de la corriente de tránsito. Se investigan la velocidad, el volumen y la densidad; el origen y destino del movimiento; la capacidad de las calles y carreteras; el funcionamiento de: pasos a desnivel, terminales, intersecciones canalizadas; se analizan los accidentes, etc.

Así se pone en evidencia la influencia de la capacidad y las limitaciones del usuario en el tránsito; se estudia al usuario particularmente desde el punto de vista psíquico-físico, indicándose la rapidez de las reacciones para frenar, para acelerar, para maniobrar, su resistencia al cansancio, etc., empleando en todo esto, métodos modernos e instrumentos psicotécnicos, así como la metodología estadística.

2. Reglamentación del tránsito

La técnica debe establecer las bases para los reglamentos del tránsito; debe señalar sus objeciones, legitimidad y eficacia, así como sanciones y procedimientos para modificarlos y mejorarlos. Así, por ejemplo, deben ser estudiadas las reglas en materia de licencias; responsabilidad de los conductores; peso y dimensiones de los vehículos; accesorios obligatorios y equipo de iluminación, acústicos y de señalamiento; revista periódica; comportamiento en la circulación, etc.

Igual atención se da a otros aspectos, tales como: prioridad del paso; tránsito en un sentido; zonificación de la velocidad; limitaciones en el tiempo de estacionamiento; control policiaco en las intersecciones; procedimiento legal y sanciones relacionadas con accidentes; peatones y transporte público.

3. Señalamiento y dispositivos de control

Este aspecto tiene por objeto determinar los proyectos, construcción, conservación y uso de las señales, iluminación, dispositivos de control, etc. Los estudios deben complementarse con investigaciones de laboratorio.

Aunque el técnico en tránsito no es responsable de la fabricación de estas señales y semáforos, a él incumbe señalar su alcance, promover su empleo y juzgar su eficiencia.

4. *Planificación vial*

Es indispensable, en la Ingeniería de Tránsito, realizar investigaciones y analizar los diferentes métodos, para planificar la vialidad en un país, en una municipalidad o en una pequeña área, para poder adaptar el desarrollo de las calles y carreteras a las necesidades del tránsito.

Parte de esta investigación está dedicada exclusivamente a la planificación de la vialidad urbana, que permite conocer los problemas que se presentan al analizar el crecimiento demográfico, las tendencias al aumento en el número de vehículos y la demanda de movimiento de una zona a otra.

Es reconocido que el tránsito es uno de los factores más importantes en el crecimiento y transformación de un centro urbano y de una región, y es por esto que el punto de vista del Ingeniero de Tránsito debe ser considerado en toda programación urbanística y en toda planificación de política económica.

El técnico a su vez debe acostumbrarse a tener en cuenta en sus trabajos las distintas exigencias de la colectividad de la higiene, de la seguridad, de las actividades comerciales e industriales, etc.

5. *Administración*

Es necesario examinar las relaciones entre las distintas dependencias públicas que tienen competencia en materia vial y su actividad administrativa al respecto. Deben considerarse los distintos aspectos tales como: económico, político. fiscal, de relaciones públicas, de sanciones, etc.

A su vez, la Ingeniería de Tránsito del futuro, deberá ir muy de la mano con temas tales como [7]: 1) los sistemas *intermodales*, donde el transporte masivo juega un papel importante; 2) el progreso en los *sistemas de transporte inteligentes*, a través del uso de las comunicaciones y la tecnología de las computadoras; 3) la preservación de la *función y jerarquía* del sistema vial, mediante el diseño o rediseño de buenas prácticas, que permitan el acceso a la tierra; 4) el *manejo de la congestión*, debido a que la expansión potencial para nuevas vialidades es muy limitada y a menudo no factible; 5) el *aseguramiento de la movilidad*; y 6) el *impacto ambiental*, relacionado con el ruido, la calidad del aire, humedales, zonas históricas, alamedas, fuentes naturales, especies animales y vegetales, energía, impactos sociales e impactos económicos.

Finalmente, debe hacerse énfasis en lo siguiente: el *Ingeniero de Tránsito* debe estar capacitado para encontrar la mejor solución al menor costo posible.

Naturalmente, puede pensarse en infinidad de soluciones por demás costosas, pero el técnico preparado en la materia además de estar capacitado para encontrar esta mejor solución, debe desarrollar eficientemente acciones a largo plazo, que tiendan a mejorar las condiciones del tránsito sin poner restricciones innecesarias al mismo.

Referencias bibliográficas

[1] Real Academia Española. *Diccionario de la Lengua Española*. Decimonovena edición, Editorial Espasa-Calpe, S.A., Madrid, 1970.

[2] Institute of Transportation Engineers. *Traffic Engineering Handbook*. Fifth edition, James L. Pline Editor, Washington, D.C., 1999.

[3] Cárdenas, G., James. *Diseño Geométrico de Carreteras*. Primera edición, Ecoe Ediciones, Bogotá, D.C., 2002.

[4] Manheim, Marvin L. *Fundamentals of Transportation Systems Analysis, Volume 1: Basic Concepts*. Fourth printing, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, and London, England, 1984.

[5] Instituto Mexicano del Transporte, Secretaría de Comunicaciones y Transportes. *Sistema Integral de Transporte*. Publicación Técnica No.2, México, 1992.

[6] Homburger, Wolfgang S.; Hall, Jerome W.; Sullivan, Edward C. and Reilly, William R. *Fundamentals of Traffic Engineering*. 15th edition, Institute of Transportation Studies, University of California at Berkeley, California, 2000.

[7] Roess, Roger P.; Prassas, Elena S. and Mcshane, William R. *Traffic Engineering*. Third edtion, Pearson Prentice Hall, New Jersey, 2004.

4

Usuario

4.1 Generalidades

Con el propósito de estudiar los aspectos operacionales de la ingeniería de tránsito, es importante analizar primeramente, de manera muy general, los *elementos básicos* que hacen que se produzcan los flujos de tránsito y, que por lo tanto interactúan entre sí; éstos son [1]:

- El *usuario*: conductores, peatones, ciclistas y pasajeros.
- El *vehículo*: privado, público y comercial.
- La *vialidad*: calles y carreteras.
- Los *dispositivos de control*: marcas, señales y semáforos.
- El *medio ambiente* general.

Siempre que se trate de la planeación, estudio, proyecto y operación de un sistema de transporte automotor, el ingeniero de tránsito debe conocer las habilidades, limitaciones y requisitos que tiene el usuario, como elemento de la ingeniería de tránsito.

Los seres humanos, como *usuarios* de los difierentes medios de transporte, son elementos primordiales del tránsito por calles y carreteras, quienes deben ser estudiados y entendidos claramente con el propósito de poder ser controlados y guiados en forma apropiada. El comportamiento del individuo en el flujo de tránsito, es con frecuencia, uno de los factores que establece sus características.

Los *vehículos* poseen diferentes características que deben ser tenidas en cuenta, tales como: las dimensiones, el peso, la potencia, los radios de giro, la velocidad, el poder de aceleración y desaceleración, la capacidad de frenado, etc.

Las características del *sistema vial* también son importantes, las cuales tienen que ver con su geometría, accesibilidad, movilidad, función y categoría, entre otras.

Los *dispositivos de control*, son los medios con los cuales se comunican los conductores, para así ser guiados en la circulación, bajo las leyes del tránsito, la regulación y las instrucciones operacionales.

Las características del *medio ambiente*, es aquel conjunto de condiciones que hacen, a su vez, que las características del usuario, del vehículo y del sistema vial, varíen

sistemáticamente, como lo pueden ser el estado del tiempo, la iluminación, la oscuridad, el grado de desarrollo lateral, etc.

4.2 Peatón

Se puede considerar como peatón potencial a la población en general, desde personas de un año hasta de cien años de edad. Prácticamente todos somos peatones, por lo tanto, a todos nos interesa este aspecto. También, puede decirse, que el número de peatones en un país casi equivale al censo de la población. La fotografía de la figura 4.1 ilustra en cierta manera esta afirmación.

Figura 4.1 Relación entre el número de peatones y el censo de la población

Por otra parte, es importante estudiar al peatón porque es, por jerarquía entre modos, el más vulnerable, lo cual lo convierte en un componente importante dentro de la seguridad vial. En la mayoría de los países del mundo, que cuentan con un número grande de vehículos, los peatones muertos anualmente en accidentes de tránsito ocupan una cifra muy alta. Muchos de los accidentes sufridos por peatones ocurren porque éstos no cruzan en las zonas demarcadas para ellos o porque no siempre los flujos están adecuadamente canalizados. Las fotografías de la figura 4.2 muestran los semáforos peatonales, los cuales permiten un mejor control para el cruce de peatones.

Figura 4.2 *Semáforos peatonales*

Tanto el conductor como el peatón, en muchos casos, no han asimilado el medio en que se mueven y lo que significan como usuarios del transporte. En las actividades comunes del conductor y el peatón, en las calles, en la vida diaria, sigue existiendo situaciones anormales. Esto se nota más claramente en aquellos sitios en que el conductor del vehículo automotor no le cede el paso al peatón donde comparten un mismo espacio para circular. Y por otro lado, con la gente que viene de fuera del medio, como el provinciano que llega a una ciudad; está indeciso en los cruceros esperando un momento oportuno, sin saber de qué lugar vienen los vehículos y repentinamente trata de cruzar corriendo, o los peatones que cruzan por lugares no debidos.

El peatón es, dentro de la jerarquía de medios para movilizarse, el más importante y a su vez el más vulnerable, razón por la cual mundialmente se ha hecho conciencia de dicha situación. Un ejemplo de ello, es la Carta de los Derechos del Peatón, adoptada por el Parlamento Europeo, la cual se transcribe a continuación:

- El peatón tiene derecho a vivir en un entorno sano y a disfrutar libremente de los espacios públicos en condiciones que garanticen adecuadamente su bienestar físico y psicológico.

- El peatón tiene derecho a vivir en lugares (urbanos o rurales) pensados para las necesidades de las personas y no para las de los vehículos, y a disponer de dotaciones a distancias que pueda recorrer caminando o en bicicleta.

- Los niños, las personas mayores y los discapacitados tienen derecho a que las poblaciones sean lugares que faciliten el contacto social y no lugares que agraven su propia situación de debilidad.

- Las personas con discapacidades tienen derecho a medidas específicas que mejoren su movilidad autónoma, como reformas en los espacios públicos, los sistemas de transporte y el transporte público (líneas guía, señales de advertencia, señales acústicas, autobuses y vagones de tren o tranvía accesibles).

- El peatón tiene derecho a que ciertas zonas urbanas sean para su uso exclusivo, lo más extensas posible, y que no sean simples recintos peatonales sino que estén en relación con la organización general de la ciudad, y también el derecho a que conecten itinerarios cortos, lógicos y seguros.

- El peatón tiene el derecho a reclamar, en particular: 1) que se tengan en cuenta los límites en cuanto a emisiones de sustancias y ruido que se consideran científicamente tolerables; 2) el uso en todos los medios de transporte público de vehículos que no sean una fuente de contaminación aérea o acústica; 3) la creación de pulmones verdes que incluyan la plantación de árboles en áreas urbanas; 4) que se fijen límites de velocidad y que se modifique la disposición de carreteras y cruces como forma de garantizar la seguridad de la circulación a pie o en bicicleta; 5) la retirada de anuncios que animen al

uso peligroso e inadecuado de los vehículos de motor; 6) un sistema de señalización de tránsito eficaz cuyo diseño tenga en cuenta las necesidades de las personas ciegas y las sordas; 7) la adopción de medidas específicas que aseguren que tanto el tránsito vehicular como el peatonal tengan facilidad de acceso y libertad de movimientos así como la posibilidad de pararse en las aceras y las calzadas respectivamente; 8) ajustes en la distribución y el diseño de los vehículos de motor para dotarles de unas líneas más suaves en las partes que más sobresalen, y hacer más eficientes los sistemas de señalización; 9) la introducción de un sistema de responsabilidad ante el riesgo, de modo que la persona que crea el peligro carga con las consecuencias económicas derivadas; 10) un programa de formación para conductores diseñado para animar a una conducción apropiada que respete a los peatones y a los usuarios lentos de las carreteras.

- El peatón tiene derecho a la movilidad total y sin impedimentos, que puede conseguirse mediante el uso integrado de medios de transporte. En particular tiene el derecho a exigir: 1) un servicio de transporte público ecológicamente sensato, extenso y bien equipado que deberá cubrir las necesidades de todos los ciudadanos, los sanos y los discapacitados; 2) la provisión de facilidades para bicicletas en todas las áreas urbanas; 3) zonas de estacionamiento situadas de tal forma que no afecten a la movilidad de los peatones ni a la capacidad de disfrutar de áreas de arquitectura notable.

- Cada estado miembro debe garantizar la difusión de información extensa sobre los derechos de los peatones y sobre medios de transportes alternativos y no contaminantes, a través de los canales más idóneos y desde los primeros niveles de enseñanza.

Para el tránsito de peatones, a semejanza con los vehículos se puede establecer un *nivel de servicio*.

Las medidas cualitativas utilizadas para caracterizar el flujo peatonal son similares a las utilizadas para el tráfico vehicular; por ejemplo, elegir la velocidad de circulación y la libertad de realizar adelantamientos. Otras medidas se refieren específicamente al flujo peatonal, como la habilidad de cruzar corrientes vehiculares, caminar en sentido contrario, libertad de maniobrar libremente y sin que se presenten conflictos en la velocidad de caminata.

Existen otros factores relacionados con el entorno, los cuales afectan la experiencia de caminar y la percepción del nivel de servicio, como el confort, la comodidad, la seguridad y la economía.

En la tabla 4.1 se muestran los criterios adoptados por el *Manual de Capacidad de Carreteras*, HCM 2000, de los Estados Unidos, en la definición de los niveles de servicio peatonales, para condiciones promedio [2].

Tabla 4.1 Niveles de servicio peatonales en aceras y senderos, según el HCM 2000

Nivel de servicio	Espacio (m^2 por peatón)	Tasa de flujo (peat/min/m)	Velocidad (m/s)
A	>5.60	≤16	>1.30
B	>3.70-5.60	>16-23	>1.27-1.30
C	>2.20-3.70	>23-33	>1.22-1.27
D	>1.40-2.20	>33-49	>1.14-1.22
E	>0.75-1.40	>49-75	>0.75-1.14
F	≤0.75	Variable	≤0.75

Fuente: TRB. *Highway Capacity Manual*. HCM 2000.

En la tabla anterior, se acepta el nivel de servicio *E* como aquel al cual se llega a la máxima tasa de flujo de servicio o capacidad, la que indica que por cada metro de sección transversal de acera pueden pasar un máximo de 75 peatones por minuto, a una velocidad de 0.75 metros por segundo (2.7 kilómetros por hora). Esto, en otras palabras, en términos de espacio representa 0.75 metros cuadrados por peatón.

En el año 2005, Cal y Mayor y Asociados, S.C., desarrolló para la Secretaría de Tránsito y Transporte de Bogotá, el Manual de Planeación y Diseño para la Administración del Tránsito y Transporte [3], adaptando la metodología del HCM 2000, mediante la realización de trabajos de campo en diversos puntos de la ciudad. Básicamente, la calibración de los parámetros estuvo orientada en la definición de los valores de la superficie peatonal que delimita los diferentes niveles de servicio. En la Tabla 4.2 se muestran los mismos criterios del HCM 2000, obtenidos con base en información de campo local en la ciudad de Bogotá.

Tabla 4.2 Niveles de servicio peatonales en aceras y senderos, caso Bogotá

Los valores encontrados para el caso Bogotá son ilógicos.

Nivel de servicio	Espacio (m2 por peatón)	Tasa de flujo (peat/min/m)	Velocidad (m/s)
A	≥7.00	≤ 14	≥1.63
B	≥1.00	≤ 91	≥1.51
C	≥0.77	≤115	≥1.47
D	≥0.40	≤194	≥1.30
E	≥0.17	≤287	≥0.83
F	<0.17	Variable	<0.83

Fuente: C&M. *Manual de Planeación y Diseño para la Administración del Tránsito y el Transporte*. Secretaría de Tránsito y Transporte, Alcaldía Mayor de Bogotá, 2005.

Si se pudiera prever el volumen de peatones que va a tener cierta sección comercial de la ciudad, se partiría de esta base para proyectar el ancho de las aceras. También se puede medir la deficiencia de las aceras actuales, pues se sabe que muchas de las que se tienen en el centro comercial, son insuficientes, o que no llenan el requisito de capacidad, por lo que se pueden tomar acciones tendientes a mejorar sus condiciones.

Las velocidades de caminata de los peatones disminuyen a medida que la densidad peatonal en las aceras aumenta. El ancho efectivo de las aceras se reduce ante la presencia del mobiliario urbano como puestos de revistas, parquímetros, hidrantes, postes de servicio o cualquier otro elemento que interfiera su uso total.

Para análisis detallados de aceras y senderos peatonales, se recomienda consultar la metodología operacional del HCM 2000 [2], el Manual de Planeación y Diseño para la Administración del Tránsito y Transporte de Bogotá [3] y la Guía para el Planeamiento, Diseño y Operación de Facilidades Peatonales de la AASHTO [4].

4.3 Ciclista

Otro usuario, elemento importante del tránsito y el transporte, es el *ciclista*, que de alguna manera, ya sea en el desarrollo de una actividad de recreación, trabajo, compras o estudio, debe desplazarse de un lugar a otro, sobre facilidades exclusivas o mezcladas con el tránsito peatonal y vehicular. Independientemente de cómo lo realice, siempre ha sido vulnerable a muchos factores tales como: a la accidentalidad producida por la interacción con los vehículos motorizados, a la inseguridad por la facilidad a robos o atracos, a la geografía y topografía tortuosa misma del lugar y, porque no decirlo, al medio ambiente "adverso", como por ejemplo la lluvia.

Sin embargo, con el crecimiento de las ciudades y el aumento de la contaminación ambiental debida a los vehículos automotores, es necesario, y ya se están comenzando a implantar, sistemas de transporte alternativos que utilizan medios no motorizados, ambientalmente inofensivos y sostenibles que no usen carburantes; y uno de esos es la *bicicleta*. Para que esto se logre, las ciclovías y los carriles para los ciclistas deberán llenar todos los requisitos necesarios, en su diseño y operación, de tal manera que su vulnerabilidad sea la más mínima posible.

Ciclovía, es el nombre genérico dado a parte de la infraestructura pública u otras áreas destinadas de forma exclusiva para la circulación de bicicletas. Los criterios de diseño [5] de las ciclovías son algo similares a los de las calles y carreteras, pero gobernados por las características de operación de las bicicletas, que son muy diferentes a las de los vehículos motorizados. En este sentido, las consideraciones de diseño importantes para que una ciclovía sea segura incluyen el ancho de la pista o calzada, la velocidad de proyecto, el alineamiento horizontal y el alineamiento vertical. Por el contrario, un *carril para bicicleta* es aquella parte de la calle o carretera específicamente reservada también para uso exclusivo o preferencial de los ciclistas. Los carriles para bicicletas pueden delinearse con franjas, señalamientos, o marcas en el pavimento. Estos carriles siempre deben seguir el mismo sentido del tránsito.

García María Isabel [6], Corresponsal de la Agencia Internacional de Noticias IPS (Internacional Press Service), en reportaje publicado en la página Web de Tierramérica, que es un servicio especializado de información sobre medio ambiente y desarrollo, dice que "Colombia y Brasil son los pioneros en el uso de la bicicleta como alternativa de transporte no motorizado en América Latina". Expone la corresponsal también que "Río de Janeiro cuenta con una amplia red vial exclusiva para ciclistas, con estacionamientos adecuados para las bicicletas, con un uso más de esparcimiento y de salud, que de transporte, por lo que éstas están ubicadas en zonas turísticas y a lo largo de las playas. A su vez, en Cuba, el uso de la bicicleta también siempre ha sido muy común. Otras ciudades latinoamericanas empiezan a dar los primeros pasos en este sentido.

Entre tanto, en la Ciudad de México, con 20 millones de habitantes, el uso de la bicicleta como alternativa de transporte aún es mínimo".

Venezuela [7], implementó sus primeros 14 kilómetros de ciclovía en el municipio del Chacao en Caracas a mediados del año 2004, con el objetivo de mejorar las condiciones sociales, ambientales y económicas de los habitantes del municipio y sus transeúntes, y desarrollar un sistema de transporte más eficiente, económico, no contaminante y saludable para el usuario, siguiendo las exitosas experiencias en otras ciudades de Europa y América.

Bogotá [8] es la ciudad Latinoamericana que cuenta con la red más completa de ciclovías, las cuales han sido diseñadas y construidas entre los años 1999 y 2006. Se seleccionó el concepto de red en malla (principal, secundaria y complementaria) por ser el modelo teórico que presenta mayor versatilidad y adecuación, trazando de esta manera ejes longitudinales y transversales en la ciudad.

En la Ciudad de México [9], donde se define la ciclovía como un espacio confinado y señalizado, construido especialmente para que la población pueda desplazarse en medios no contaminantes ya sea en viajes de placer o utilitarios (de trabajo, escuela o compras), de manera segura y agradable, se ha utilizado el derecho de vía del ex-ferrocarril a Cuernavaca para la construcción de la ciclovía en el suelo de conservación en una longitud de 33.2 kilómetros con estaciones. Esta ciclovía ha sido fomentada por el Instituto Mexicano de Fomento al Uso de la Bicicleta Urbana (IMFUBU) y la organización no gubernamental Bicitekas, que promueven el uso de la bicicleta y exigen planes que incluyan facilidades para tal fin.

El en año 2001 [10], se inauguró la ciclovía más larga del mundo en Europa y más específicamente en los países que colindan con el Mar del Norte, que comprende seis países, Alemania, Holanda, Gran Bretaña, Noruega, Suecia y Dinamarca con una longitud de 6,000 kilómetros pasando por parques naturales, playas y ciudades históricas y pintorescas.

Sin disponer de cifras exactas, en la China y la India, y en muchos pueblos de América Latina, la bicicleta continúa aún siendo el principal medio de transporte. Además, se ha constatado [11] que en ciudades congestionadas y para distancias de hasta 5-7 kilómetros, la bicicleta es el medio de transporte más rápido.

A continuación se mencionan una serie de ventajas, que justifican el uso de la bicicleta:

- Disminución de la contaminación atmosférica.
- Disminución de la congestión vehicular.
- Quien la utiliza, mantiene un buen nivel de actividad física y de salud.
- Ahorro de costos de transporte.
- Más humana y más amable con el medio ambiente.
- No se congestionan, el tiempo de desplazamiento siempre es el mismo incluso en horas de máxima demanda de ciclistas.
- Ecológicamente sostenible.
- No requiere de la construcción de una infraestructura tan costosa.
- Mejora el estado de ánimo de quienes lo practican.

Entonces lo que se requiere es disponer y adecuar espacios para utilizar la bicicleta, haciendo de ella un uso masivo como modo de transporte. Es necesario convertir en ciclovías muchos derechos de vías por donde circulaban antiguamente los trenes; disponer de áreas libres de autos en centros históricos donde la prelación la tengan los ciclistas y obviamente los peatones; fomentar el uso de la bicicleta para ir al trabajo; disminuir la inversión en infraestructura vial para los vehículos motorizados; crear oficinas y organismos que apoyen a la gente y tomen conciencia de las ventajas del uso de la bicicleta; y rescatar e impulsar los usos laborales tradicionales que ha tenido la bicicleta, en panadería, jardinería, mensajería, servicios domiciliares, etc.

4.4 Conductor

¿Qué significa el vehículo para la mayor parte de los conductores? En los capítulos anteriores se ha visto que el vehículo de motor es algo novedoso que se ha puesto repentinamente en las manos de millones de personas, y que tiene sólo de 80 á 100 años de estar entre nosotros. Por lo regular, el que conduce un vehículo conoce el mecanismo, sabe lo que es el volante, las velocidades, el freno, etc., pero desconoce las limitaciones, la potencialidad de ese vehículo y carece de destreza para mezclarlo en la corriente de tránsito. Con apoyo en las estadísticas de accidentes se puede asegurar que *el vehículo, sin la preparación previa del individuo a través de la educación vial, ha sido convertido en un arma homicida.* El individuo que maneja un automóvil, la mayor parte de las veces no se da cuenta de que con un leve movimiento del pedal puede acabar con la vida de varias personas en pocos instantes. La fotografía de la figura 4.3 ilustra el mecanismo, la potencialidad y las limitaciones de un vehículo.

Figura 4.3 *Mecanismo, potencialidad y limitaciones del vehículo*

A través del tiempo, sin embargo, el hombre ha demostrado una gran adaptabilidad a los cambios de la vida moderna. Se ha visto como el individuo es capaz de conducir carretas y rápidamente cambiar a la conducción de diligencias, de mayor velocidad,

para posteriormente adaptarse a las condiciones del vehículo de motor. Según ha ido cambiando y evolucionando el vehículo, el hombre se ha ido adaptando con facilidad, y así como conducía antes vehículos con una velocidad máxima de 30 km/h, en pocos años ha conducido vehículos que pasan de 1,000 km/h; naturalmente, en estos últimos, en competencias deportivas en distancias rectas muy cortas. Al vehículo de turismo común y corriente, se le ve en los eventos deportivos alcanzar promedios de velocidad de 200 á 300 km/h.

El individuo tiene la facultad de adaptarse a cualquier innovación que le presenten; se ha demostrado que un piloto lo mismo conduce una carreta de bueyes que un avión a mayor velocidad que la del sonido. Luego no han sido las limitaciones físicas en el hombre sino la falta de adaptación de las masas. Pero no solamente debe adaptarse al piloto de pruebas o al corredor profesional, sino que existe la obligación de preparar a todos los peatones y conductores.

4.5 Visión

El órgano visual se asemeja mucho a una cámara fotográfica, según se aprecia en la Figura 4.4. Está compuesto de una cavidad que, al igual que la cámara fotográfica, en su parte frontal posee una lente formada por el iris, la pupila, la córnea, el cristalino y el párpado, que actúan como el diafragma y el obturador, con la propiedad de ampliarse o reducirse de acuerdo con la cantidad de luz que quiera admitir esa cavidad interior.

En su parte posterior está la retina, que es una serie de celdas que perciben el estímulo exterior y mandan el mensaje al cerebro. Los músculos pueden variar la distancia focal, mediante ciertos movimientos del ojo, permitiéndole a la persona enfocar a diferentes distancias.

Figura 4.4 El ojo humano y la cámara fotográfica

De la facultad de enfocar se citan a continuación algunas cifras que pueden ser de interés a este respecto: para el movimiento de la cabeza del usuario se han hecho algunos experimentos para determinar cuánto tiempo tarda en ver un objeto, hacer un ligero movimiento y observar otro en dirección diferente. *Reaccionar* significa que

el mensaje es enviado del ojo al cerebro y éste ordena el movimiento a los músculos, para *accionar*. Para cambiar de ángulo se necesitan de 0.1 a 0.3 segundos. Finalmente, el tiempo necesario para enfocar es de 0.17 a 3 segundos, si se sale de un medio oscuro a uno de luz natural, en cuyo caso el órgano visual humano tarda más tiempo en adaptarse. Así, en la salida de un túnel, en promedio tarda aproximadamente 3 segundos, dependiendo de cada individuo.

Un conductor que llega a una esquina, para saber únicamente si el paso está libre tarda: para voltear hacia la derecha de 0.1 a 0.3 segundos, enfocar 0.3 segundos, voltear a la izquierda de 0.1 a 0.3 segundos, y finalmente enfocar otra vez 0.3 segundos. Esto es, la suma total del tiempo necesario para voltear a la derecha, enfocar, voltear a la izquierda y enfocar es de 1.2 segundos, tomando valores máximos. Son valores obtenidos a través de experiencias directas, es decir, en forma empírica.

Los *defectos* más comunes de la visión son: *miopía*, *presbicia*, *astigmatismo* y *estrabismo*, que se corrigen por medio de la adaptación de lentes o intervenciones quirúrgicas. Gracias a estos recursos no hay razón para impedir que una persona maneje un vehículo, si su defecto visual se puede corregir perfectamente.

Otro defecto, ya no tan común, es el *daltonismo*, que se manifiesta en la dificultad en distinguir ciertos colores. La persona que padece de daltonismo, en grado crítico, no distingue ningún color. Naturalmente, el no poder distinguir entre el rojo y el verde de un semáforo podría ser un impedimento grave; sin embargo, hace muchos años se realizó una convención entre autoridades de tránsito y fabricantes de semáforos para resolver ese problema. Se llegó a la conclusión de que se pusieran todos de acuerdo para que la luz de la parte superior fuera roja. De esta manera, aquellas personas que sufren de daltonismo tendrán la indicación suficiente, sabiendo que la luz superior es la de ALTO, aunque no distingan entre rojo, verde y amarillo.

La *visión normal* de una persona viendo hacia el frente abarca todo lo que sucede en un ángulo de 180°. Casi todas las personas perciben lo que acontece a ambos lados de la cabeza, o sea formando un ángulo de 180°, pero no distinguen detalles. Estos únicamente se identifican en un ángulo más cerrado, llamado ángulo central de *visión periférica*, que varía entre 120° y 160°.

También hay personas que padecen del defecto de *visión de túnel*, consistente en que no distinguen absolutamente nada fuera de cierto cono de visión. El caso puede llegar a ser crítico y se estima que cuando la persona tiene visión de túnel menor de 140°, no debe manejar.

Algo semejante a la visión de túnel les ocurre a todos los conductores a alta velocidad. A medida que el vehículo aumenta de velocidad el conductor sufre visión de túnel, debido a que enfoca a mayor distancia, dejando de percibir los detalles de los lados. Sólo ve claramente dentro de un cono cuyo vértice es el centro de los órganos visuales. Cualquiera lo habrá experimentado y lo puede observar al conducir en carretera. Al aumentar la velocidad la vista se fija más lejos, dejando de percibir detalles cercanos. Muchas veces, cuando va algún acompañante en el vehículo y nos dice: ¿Te fijaste en Fulano?, la respuesta es no lo vi. ¿Por qué?, porque nuestra vista va fija en un punto lejano y no percibimos los detalles laterales adyacentes. Esto quiere decir que

en una ciudad donde los detalles son múltiples y hay que tener mucho cuidado, la velocidad no debe ser muy alta, precisamente porque el conductor pierde la facultad de distinguir lo que sucede a su alrededor inmediato. Este efecto se aprecia perfectamente en la fotografía de la figura 4.5.

Figura 4.5 Enfoque en un primer plano y a distancia considerable

Debido a la concentración visual, el alcance efectivo de la visión periférica se contrae al incrementarse la velocidad, desde un ángulo central de 100° a 30 km/h hasta un ángulo de 40° a 100 km/h. En otras palabras, si se atraviesa un poblado a 100 km/h, no se perciben claramente más que los detalles que estén dentro de un ángulo cerrado de 40°. Este aspecto es bien importante, ya que la lectura de textos se puede realizar sobre señales que estén ubicadas dentro de ciertos ángulos.

Igualmente, a medida que aumenta la velocidad del vehículo aumenta la distancia a la cual la persona está enfocando su visión. Así se tiene que a una velocidad de 30 km/h la vista de la persona está fija en un punto localizado aproximadamente a 150 metros de distancia; a 60 km/h, a 300 metros y a 80 km/h, la vista del usuario estará fija a 450 metros.

Siendo la visión uno de los dos factores limitantes en el conductor, además del tiempo de reacción, se presentan unas sencillas pruebas que toda persona puede hacer [12]. No se trata de pruebas que puedan sustituir a un reconocimiento médico, sino experimentos rudimentarios que pueden ayudar a descubrir deficiencias que deben ser confirmadas por el médico. Sirven sólo de orientación.

Lea el texto de letra pequeña que sigue a continuación. Si puede leerlo claramente, sin lentes y a 35 centímetros de distancia, con cada ojo por separado, tapándose uno primero y después el otro, su vista es normal.

Si puede leer esto a 35 centímetros de distancia (la aceptada como normal para la lectura), sin lentes y con cada uno de los dos ojos, su agudeza visual es normal.

Lea las letras grandes que siguen a continuación, de la siguiente manera: colóquelas a una distancia de 6 metros, con cada ojo por separado y luego con los dos. Si su visión es de 20/20, es decir normal, esa lectura no deberá ofrecer dificultad.

D E F P O T E

Sostenga verticalmente un lápiz frente a usted, al nivel de los ojos. Cierre un ojo y acerque lentamente el dedo índice de la otra mano hasta tocar la punta del lápiz. Si su percepción de profundidad es deficiente, en ocasiones no acertará a tocar la punta del lápiz.

Enrolle, sin apretarlo, un periódico para formar un tubo a través del cual pueda ver con los ojos. Reduzca la intensidad de la luz de la habitación, dejando la suficiente para poder leer esta página. Ahora encienda un foco de 100 watts y mírelo a través del tubo durante 5 segundos. Apague ese foco y con la luz ambiente anterior mire esta página otra vez a través del tubo. Antes de transcurridos 7 segundos deberá usted poder leer el texto. Si no es así, puede padecer una deficiente capacidad de adaptación a los cambios de luz, lo que puede ser peligroso en el manejo.

Como anteriormente se dijo, el ángulo de visión normal es de 180°. Es decir, con la mirada fija al frente se deben percibir todos los objetos a nuestro alrededor. Para determinar si la visión es normal fije su vista en un punto situado frente a usted. Sosteniendo un lápiz en cada mano, levante los brazos hacia atrás, a la altura de los hombros y luego adelántelos lentamente, mirando de frente todo el tiempo, hasta que pueda ver ambos lápices a la vez. Se considera peligroso si el ángulo de visión es menor de 140°.

El *astigmatismo*, o deformación de la curvatura de la córnea y/o del cristalino, puede empañar o deformar las imágenes. Sostenga a 35 centímetros de distancia los círculos que aparecen en la figura 4.6. Examínelos con cada ojo, por separado, con anteojos y sin ellos. Si cualquiera de las líneas en alguno de los círculos aparece más definida y oscura que las demás, lo más seguro es que padezca astigmatismo, tenga o no una agudeza visual de 20/20.

Es importante recordar que todas las pruebas presentadas anteriormente no constituyen exactamente lo que podría considerarse un examen completo de la vista. Sin embargo, si usted ha advertido alguna deficiencia o diferencia, es conveniente realizar una visita al médico.

Figura 4.6 Prueba de astigmatismo

4.6 Reacciones físicas y psicológicas

Hay dos tipos de reacciones en el individuo: la *reacción física* o *condicionada* y la *reacción psicológica*.

La *reacción condicionada* está relacionada con el sector de conductores que han desarrollado ciertos hábitos. A las personas que están acostumbradas a utilizar cierta ruta especial, determinada carretera o calle, se les desarrolla un hábito que se convierte en destreza. Pueden llegar a cierto crucero y prever el peligro; pueden tener en cuenta cosas que la persona que pasa por primera vez no advierte. Entonces esas personas han desarrollado cierta habilidad, a la vez que una reacción condicionada, por haber usado esa ruta muchas veces.

Como comparación y mayor claridad, se cita a continuación uno de los experimentos que se han realizado en laboratorios de biología con animales: a un perro al que se le ha hecho una operación previa, mediante la cual se le ha introducido una canalización al estómago conectando las glándulas de las que se obtiene la secreción del jugo gástrico, con el exterior, se le da de comer a determinada hora, pero instantes antes se hace sonar una campana. Se ve que cada vez que va a recibir el alimento secreta unas gotas de jugo gástrico a través de la canalización. Llega a tal grado el hábito del perro que, aunque no vea la comida, simplemente al oír la campana empieza a secretar jugo gástrico. Eso es lo que se llama una reacción condicionada.

De la misma manera, el conductor de un vehículo reacciona de acuerdo con los hábitos buenos o malos que se ha formado. Por lo general el hábito o la experiencia que ha adquirido el usuario, es la mejor defensa contra los accidentes.

La *reacción psicológica*, en cambio, es un proceso intelectual que culmina en un juicio. Se trata de estímulos que son percibidos y enviados al cerebro. Después de obtener una reacción se llega a una decisión para actuar. Son reacciones intelectuales del individuo, pero están afectadas por las emociones y otras causas que pueden modificar las facultades del mismo.

Se puede imaginar el diagrama de cómo llegan esas emociones, esos estímulos, al cerebro, a través de los órganos sensitivos del hombre: tacto, oído, vista, etc. Esas reacciones envían un mensaje al cerebro; éste tiene que reaccionar mediante un proceso

intelectual y tomar una decisión para actuar; finalmente, manda la orden al músculo apropiado, que actúa de inmediato.

Hay un tiempo mínimo de reacción en estos procesos. Este tiempo de reacción es el que corresponde al estímulo simple, es decir, no a una situación complicada, sino a una situación sencilla cuando existe un estímulo único. Se llama en este caso, *estímulo*, a cualquier emergencia que se presente en la carretera o en la calle: un peatón que cruza, un animal, una desviación, cualquier obstáculo, etc. Es el estímulo que percibe el usuario y que lo anima a actuar.

El *tiempo mínimo de reacción* que se ha encontrado en el promedio de los individuos, cuando el vehículo no está en movimiento, es de 0.25 segundos. Este tiempo es, por ejemplo, el que tarda un conductor que está parado en espera del cambio de luz del semáforo, para reaccionar cuando pase de rojo a verde y coloque velocidad para arrancar el vehículo. De acuerdo con pruebas que se han efectuado con semáforos aislados, los tiempos promedio de reacción fueron los siguientes: 0.25 segundos, cuando el vehículo está inmóvil y 0.83 segundos, para el vehículo en movimiento, dependiendo de las circunstancias del tránsito y las velocidades. Se vio que en algunos casos podía llegar hasta 2 ó 3 segundos.

Los factores que pueden modificar las facultades del individuo en el tiempo de reacción son los siguientes:

- La fatiga.
- Las enfermedades o deficiencias físicas.
- El alcohol y las drogas.
- Su estado emocional.
- El clima.
- La época del año.
- Las condiciones del tiempo.
- La altura sobre el nivel del mar.
- El cambio del día a la noche y viceversa.

Entre las reacciones del usuario, se ve que el caso más usual es el de reacción condicionada: todos los usuarios, unos más, otros menos, tienen cierta experiencia, cierto número de horas de conducir, cierto entrenamiento, etc., y sus reacciones son condicionadas, por esa causa.

De ahí que experimentos realizados hayan dado conclusiones muy interesantes. Por ejemplo: el hecho de que un semáforo esté durante años colocado en cierta posición, conocida de los conductores, es fundamental, ya que si los semáforos fuesen cambiados de lugar repentinamente, vendría la confusión en las intersecciones. Igual cosa sucede con calles de dos sentidos, que de un día para otro son cambiadas a un sentido de circulación. El usuario, que responde a reacciones condicionadas, ve de repente su ambiente cambiado; se encuentra con que ayer podía cruzar en dos sentidos por esa calle y hoy sólo puede hacerlo en uno. Se produce una confusión.

Otro caso es el de las señales de tránsito. Uno de los mayores esfuerzos que han hecho las autoridades de tránsito, tiende a conservar la uniformidad de las señales

en forma, color y tamaño. Desde un principio se llegó a la conclusión de conservar el menor número de formas diferentes y se tienen las ya conocidas: el cuadrado, el rectángulo, el triángulo y el octágono.

Desde que se empezaron a fabricar esas señales, se notó que el octágono era una señal que producía desperdicios en las láminas de las cuales eran cortadas para troquelarlas, pintarlas, etc. Inmediatamente pensaban los fabricantes en el porqué de producir esta señal que dejaba pequeños recortes que no servían para nada y encarecían el costo. Después de muchos experimentos y varios años de uso se llegó a la conclusión de que la señal tenía mayor valor con esa forma porque el usuario estaba ya acostumbrado. Automáticamente se reconocía la forma de esa señal y muchas veces ni siquiera se leía el texto de ALTO, sino simplemente con reconocer a distancia la forma que tenía la señal el usuario se disciplinaba a ella; es decir, actuaba mecánicamente, percibía la forma de la señal y la obedecía.

La falta de uniformidad en las señales provoca cambios bruscos en las condiciones del tránsito y confunde al usuario. Por cambios bruscos en el tránsito se entienden todos aquellos que se relacionan con reglamentos del tránsito, cambio de sentido de una calle, cambio en la posición de un semáforo o del agente, cambio de un tipo de señal, u obstáculos imprevistos en la carretera o calle. Los cambios se pueden presentar; puede existir la incorporación de una nueva modalidad en el tránsito; pero no deben ser bruscos, sino lentos. Deben ser paulatinamente incorporados al ambiente del usuario mediante campañas de preparación, películas, inserciones periodísticas, televisión, etc., para que cuando esa medida llegue al usuario no sea repentina ni brusca y encuentre buena acogida por parte del mismo.

¿Por qué es tan importante, por decirlo así, *"enamorar"* al usuario antes de implantar una medida? Porque la efectividad de una medida en el tránsito depende en su mayor parte del convencimiento y adopción de la misma por parte de aquél. Por eso se necesita, antes de implantarla, el darla a conocer, exponer las razones, convencer al usuario, etc., para garantizar el éxito de su uso en la operación. Se debe recordar siempre la máxima que dice: *"deben evitarse cambios bruscos en el tránsito"*.

4.7 Distancia para detener un vehículo

La distancia total para detener un vehículo, llamada *distancia de parada* D_p, depende de los tiempos de *percepción*, de *reacción* y de *frenado*. Se expresa como:

$$D_p = d_p + d_r + d_f \tag{4.1}$$

Donde:

d_p = distancia recorrida durante el tiempo de percepción

d_r = distancia recorrida durante el tiempo de reacción

d_f = distancia recorrida durante el tiempo de frenado

La distancia recorrida durante los tiempos de percepción y reacción ($d_p + d_r = d_{pr}$),

se lleva cabo mediante el proceso denominado *PIEV* (*Percepción, Intelección, Emoción, Volición*), que describe los cuatro componentes de la reacción en respuesta a un estímulo exterior:

1. Percepción

Impresión material producida en los sentidos por un estímulo exterior. Es una recepción sensorial de información; se percibe la situación. Para un conductor, es el intervalo de tiempo comprendido entre la aparición del objeto exterior y su reconocimiento a través de su sensación visual.

2. Intelección

Acto de entender o concebir; se entiende la situación. Es el tiempo requerido para comparar y registrar las nuevas sensaciones.

3. Emoción

Agitación del ánimo producto de la percepción y el entendimiento de la situación. Durante este tiempo el conductor utiliza el juicio y la experiencia para tomar una actitud o llegar a una decisión.

4. Volición

Acto por el cual la voluntad determina hacer algo. Es el tiempo necesario para llevar a la acción la decisión tomada.

Los diferentes componentes para el cálculo de la *distancia de parada* D_p, aparecen esquematizados en la figura 4.7.

Figura 4.7 Distancia para detener un vehículo

Dependiendo de la complejidad del problema y de las características del conductor, el tiempo de percepción-reacción t_{pr}, o tiempo durante el *PIEV*, t_{PIEV}, varía entre 0.5 y 4.0 segundos. Según la AASHTO [13], tanto en estudios anteriores como en

investigaciones recientes, muestra que en un tiempo de percepción-reacción de 2.5 segundos para situaciones de distancias de parada, ante presencia de obstáculos, quedan incluidas las características de la mayoría de los conductores. Por lo tanto, el uso de un tiempo de percepción-reacción de 2.5 segundos, excede el percentil 90 de los tiempos de percepción-reacción de todos los conductores, y por consiguiente se recomienda para fines de proyecto. Durante este tiempo se considera que la velocidad del vehículo v_o, se mantiene constante, pues su variación es muy pequeña. Por lo tanto, la *distancia de percepción-reacción* d_{pr}, para movimiento uniforme, en general se expresa como:

$$d_{pr} = v_o(t_{pr}) \tag{4.2}$$

Que para el caso de distancia de parada, ante obstáculos, se convierte en:

$$d_{pr} = v_o(t_{PIEV})$$

Reemplazando a t_{PIEV} por 2.5 segundos, para la velocidad v_o en kilómetros por hora y la distancia d_{pr} en metros, se tiene:

$$d_{pr} = v_o(km/h)(2.5\,s)\left(\frac{1{,}000\,m}{1\,km}\right)\left(\frac{1\,h}{3{,}600\,s}\right)$$

$$d_{pr} = 0.694(v_o) \tag{4.3}$$

La *distancia de frenado* d_f, depende de muchos factores: la fricción entre llantas y pavimento; el peso del vehículo; el número de ejes; el tipo de pavimento; etc. Sin embargo, estableciendo ciertas condiciones, es posible calcular dicha distancia.

La potencia de frenado del vehículo y la fricción longitudinal entre las llantas y el pavimento, controlan su capacidad para disminuir la velocidad o parar. Un vehículo que se aproxima a un ALTO con el motor desengranado y sin la aplicación de los frenos, es desacelerado solamente por la resistencia al rodamiento y la resistencia del aire.

Cuando la anterior maniobra es realizada por el vehículo con el motor engranado, la desaceleración se lleva a cabo con la resistencia al rodamiento, la resistencia del aire y la resistencia del motor. Ensayos hechos para medir la desaceleración con el vehículo engranado y sin la aplicación de los frenos, indican que ella varía de 3.5 km/h/s a 1.4 km/h/s, para velocidades comprendidas entre 110 km/h y 30 km/h, respectivamente.

Adicionalmente, si se aplican los frenos, aparece una cuarta resistencia, denominada resistencia por fricción en el frenado. En el caso de que los frenos sean aplicados súbitamente, las llantas quedarán bloqueadas o inmovilizadas y el vehículo derrapará. La longitud de las huellas dejadas por las llantas sobre el pavimento, permitirá conocer la velocidad que traía el vehículo al inicio del derrapamiento.

Por lo tanto, la distancia de frenado d_f, es recorrida por el vehículo en movimiento uniformemente desacelerado, y puede ser calculada a partir de la acción mecánica de pisar los frenos en una superficie horizontal, despreciando las resistencias al rodamiento, del aire y del motor. La figura 4.8 ilustra la relación que existe entre la velocidad, el tiempo y la distancia, en movimiento uniformemente desacelerado.

Figura 4.8 Relación entre la velocidad, el tiempo y la distancia, en movimiento uniformemente desacelerado

La ecuación de la recta es igual a:

$$v = v_o - at \tag{4.4}$$

Donde:

v = velocidad después de un tiempo t

v_o = velocidad en el momento de aplicar los frenos

a = tasa de desaceleración

Si al final del frenado se tiene una velocidad v_f, entonces:

$$v_f = v_o - at \tag{4.5}$$

El área bajo la recta representa la distancia de frenado, esto es:

$$d_f = v_f t + \frac{1}{2}(v_o - v_f)t$$

Reemplazando la velocidad final v_f, de la ecuación (4.5), se tiene:

$$d_f = (v_o - at)t + \frac{1}{2}(v_o - v_o + at)t = v_o t - at^2 + \frac{1}{2}at^2$$

De donde:

$$d_f = v_o t - \frac{1}{2}at^2 \tag{4.6}$$

Ahora despejando t de la ecuación (4.5):

$$t = \frac{v_o - v_f}{a}$$

Reemplazando este valor en la ecuación (4.6), también se obtiene:

$$d_f = v_o\left(\frac{v_o - v_f}{a}\right) - \frac{1}{2}a\left(\frac{v_o - v_f}{a}\right)^2$$

$$2ad_f = 2v_o(v_o - v_f) - (v_o - v_f)^2 = 2v_o^2 - 2v_o v_f - v_o^2 + 2v_o v_f - v_f^2$$

Por lo tanto:

$$2ad_f = v_o^2 - v_f^2 \tag{4.7}$$

También, en movimiento uniformemente desacelerado y cuando el vehículo finalmente se detiene ($v_f = 0$), la distancia de frenado es:

$$d_f = \frac{v_o^2}{2a} \tag{4.8}$$

Por otra parte, sobre el vehículo actúa una fuerza F, que se valora como:

$$F = ma \tag{4.9}$$

Donde m corresponde a la masa del vehículo.

La fuerza F debe ser contrarrestada por otra igual con el fin de detener el vehículo, denominada fuerza de fricción longitudinal F_l, que se expresa así:

$$F_l = f_l P \tag{4.10}$$

Donde:

f_l = coeficiente de fricción longitudinal

P = peso propio del vehículo

Igualando F y F_l, según las ecuaciones (4.9) y (4.10), queda:

$$F = F_l$$

$$ma = f_l P \tag{4.11}$$

Pero también se sabe que:

$$P = mg \tag{4.12}$$

Donde g es la aceleración de la gravedad.

Sustituyendo el valor de P de la ecuación (4.12) en la ecuación (4.11), resulta:

$$ma = f_l(mg)$$

$$a = f_l g \tag{4.13}$$

Ahora, reemplazando este valor de a en la ecuación (4.8), se tiene:

$$d_f = \frac{v_o^2}{2a} = \frac{v_o^2}{2f_l g}$$

Utilizando unidades prácticas y usuales, se transforma la fórmula anterior para v_o en kilómetros por hora, g en metros por segundo cuadrado y d_f en metros, como sigue:

$$d_f = \frac{v_o^2(km^2/h^2)}{2f_l(9.81\,m/s^2)}\left(\frac{1{,}000^2\,m^2}{1\,km^2}\right)\left(\frac{1\,h^2}{3{,}600^2\,s^2}\right)$$

$$d_f = \frac{v_o^2}{254(f_l)} \tag{4.14}$$

Finalmente, sustituyendo las distancias de percepción-reacción d_{pr} ecuación (4.3) y de frenado d_f ecuación (4.14), en la ecuación (4.1) la *distancia de parada* D_p queda como:

$$D_p = d_p + d_r + d_f$$

$$D_p = 0.694(v_o) + \frac{v_o^2}{254(f_l)} \tag{4.15}$$

Para fines de proyecto, tomando en cuenta coeficientes variables de fricción longitudinal [14], en la tabla 4.3 se presentan valores para las *distancias de parada*, correspondientes a diferentes velocidades de proyecto, condiciones de pavimento mojado y a nivel, ante la presencia de obstáculos.

Cuando el vehículo tiene una velocidad v_f al final de la aplicación de los frenos, y la calle o carretera sobre la cual ocurre el frenado se encuentra sobre una pendiente longitudinal p, la *distancia de frenado* d_f se expresa como:

$$d_f = \frac{v_o^2 - v_f^2}{254(f_l \pm p)} \tag{4.16}$$

La distancia de frenado es menor en ascenso que en descenso, por lo tanto el valor de p expresado en decimal o tanto por uno es positivo (+) para pendientes ascendentes y negativo (—) para pendientes descendentes.

Si el vehículo se detiene completamente, esto es $v_f = 0$, la ecuación práctica para el cálculo de la distancia de frenado es:

$$d_f = \frac{v_o^2}{254(f_l \pm p)} \tag{4.17}$$

Tabla 4.3 Distancias de parada en pavimento mojado y a nivel

Velocidad de proyecto	Percepción-reacción		Coeficiente de fricción longitudinal	Distancia de frenado	Distancia de parada D_p (metros)	
	Tiempo t_{pr}	Distancia d_{pr}	f_l	d_f		
(km/h)	(s)	(m)		(m)	Calculada	Proyecto
30	2.5	20.8	0.400	8.9	29.7	30
40	2.5	27.8	0.380	16.6	44.4	45
50	2.5	34.7	0.360	27.3	62.0	60
60	2.5	41.6	0.340	41.7	83.3	85
70	2.5	48.6	0.325	59.4	108.0	110
80	2.5	55.5	0.310	81.3	136.8	135
90	2.5	62.5	0.305	104.6	167.1	165
100	2.5	69.4	0.300	131.2	200.6	200
110	2.5	76.3	0.295	161.5	237.8	240
120	2.5	83.3	0.290	195.5	278.8	280

De la misma manera, una expresión más general para el cálculo de la distancia de parada, ante la presencia de obstáculos, es:

$$D_p = 0.694(v_o) + \frac{v_o^2}{254(f_l \pm p)} \tag{4.18}$$

Los valores del coeficiente de fricción longitudinal f_l, usados en las ecuaciones (4.17) y (4.18) se determinan mediante experimentos de frenado. Conocidas la velocidad inicial v_o y la pendiente p, se conducen los vehículos de prueba hasta realizar un alto completo, se mide la distancia de frenado requerida d_f, y se resuelve la ecuación para f_l. Los valores de f_l utilizados para fines de proyecto se estiman como conservadores, ya que se toman suponiendo: las peores habilidades en el manejo del vehículo, las condiciones normales del estado de la superficie de rodamiento y las llantas, y la eficiencia común de los vehículos [15].

En la práctica, existen otras situaciones que obligan a que un conductor tenga que detener su vehículo o disminuir su velocidad, como por ejemplo ante la presencia de la luz amarilla en un semáforo, ante la presencia de una señal de ALTO, a la salida de una carretera principal por un enlace de divergencia, a la llegada a una caseta de cobro, etc. Para estos casos, la distancia necesaria para pasar de una velocidad inicial v_o a una velocidad final v_f (que puede llegar a ser cero), es:

$$D_p = v_o(t_{pr}) + \frac{v_o^2 - v_f^2}{254(f_l \pm p)} \tag{4.19}$$

Donde t_{pr} representa el tiempo de percepción-reacción de la situación específica analizada.

Ejemplo 4.1

Mediante este ejemplo, se muestra el procedimiento de cálculo de la *distancia de visibilidad de parada* en el proyecto geométrico de carreteras.

La carretera a lo largo de su longitud, en cada punto, siempre le debe proveer al conductor una *distancia de visibilidad* hacia delante al menos igual a la *distancia de parada* D_p. Si esto no se realiza, puede suceder que el conductor que circula, por ejemplo a través de una curva, ante la presencia de un obstáculo sobre su carril de circulación, no tenga suficiente distancia para detenerse y por lo tanto colisione con él.

De allí que se asume, en el peor de los casos, que el conductor que encuentra un obstáculo en su carril de circulación, no puede esquivarlo. Esto es, el conductor deberá ver el obstáculo con suficiente tiempo y distancia, que le permita percibirlo, reaccionar y parar su vehículo.

Específicamente, se trata de determinar la distancia mínima de visibilidad de parada en un tramo de carretera proyectada con una velocidad de 80 km/h en una pendiente ascendente del 4%.

De la tabla 4.3 para una velocidad de proyecto v_o de 80 km/h, el coeficiente de fricción longitudinal f_l es de 0.310. Por lo tanto, de acuerdo con la ecuación (4.18), la distancia de parada es:

$$D_p = 0.694(v_o) + \frac{v_o^2}{254(f_l \pm p)} = 0.694(80) + \frac{(80)^2}{254(0.310 + 0.04)}$$

$$= 127.5\ m$$

Lo anterior quiere decir, que para que este tramo de carretera ofrezca seguridad para detener un vehículo en caso de la presencia de un obstáculo fijo en su carril de circulación, la geometría horizontal, vertical y transversal debe ser tal que siempre se disponga en cada punto como mínimo 127.5 metros de visibilidad hacia delante.

Ejemplo 4.2

Un tramo de carretera en una pendiente descendente del 5% tiene como velocidad de proyecto 70 kilómetros por hora. Si sobre este tramo un conductor viaja a una velocidad de 100 kilómetros por hora, ¿qué distancia adicional a la de proyecto necesitaría para detener su vehículo ante la presencia de un obstáculo fijo sobre su carril de circulación?

La distancia de parada para la velocidad de proyecto de 70 km/h, según los datos de la tabla 4.3 y de acuerdo a la ecuación (4.18), es:

$$v_o = 70\ km/h,\ \ f_l = 0.325,\ \ p = -0.05$$

$$D_p = 0.694(v_o) + \frac{v_o^2}{254(f_l \pm p)} = 0.694(70) + \frac{(70)^2}{254(0.325 - 0.05)}$$

$$= 118.73\ m$$

Igualmente, la distancia de parada necesaria para el vehículo que viaja a 100 km/h es:

$$v_o = 100\ km/h,\ \ f_l = 0.300,\ \ p = -0.05$$

$$D_p = 0.694(v_o) + \frac{v_o^2}{254(f_l \pm p)} = 0.694(100) + \frac{(100)^2}{254(0.300 - 0.05)}$$

$$= 226.88\ m$$

Luego la distancia adicional que necesitaría para detener el vehículo ante la presencia del obstáculo, es:

$$226.88 - 118.73 = 108.15\ m$$

Es importante advertir, que esta distancia adicional puede ser reducida si la habilidad del conductor y las condiciones presentes le permiten controlar el vehículo sin detenerlo.

Ejemplo 4.3

Mediante este ejemplo, se muestra un procedimiento de cálculo de los tiempos de *amarillo* y *todo rojo*, con base en la distancia de parada, para el análisis de intersecciones con semáforos.

El cambio de luz verde de una calle a otra no puede realizarse instantáneamente, pues los vehículos que se aproximan a la intersección, cuando la luz cambia, no son capaces de detenerse de manera segura.

Si los vehículos de la calle en conflicto son liberados instantáneamente, podrán ocurrir accidentes. Para evitar esto, debe proveerse de un intervalo de *cambio* (amarillo) y *despeje* (todo rojo), que indica el cambio de fase del semáforo y el despeje con seguridad de la intersección de los vehículos en conflicto.

Para tal efecto, de acuerdo con la parte a) de la figura 4.9, supóngase que el vehículo A se aproxima al acceso Oeste de la intersección (pavimento a nivel) con una velocidad v_o de 60 km/h, de tal manera que justo en la posición en que se encuentra aparece la indicación amarilla del semáforo, por lo que el conductor decide parar su vehículo ($v_f = 0$) después de recorrer la distancia D_p, terminando su fase de operación ($Fase1$). La parte b) de la figura 4.9 ilustra las dos fases bajo la cual opera esta intersección.

El tiempo de percepción-reacción t_{pr}, ante la presencia de la indicación amarilla de un semáforo, para la mayoría de los conductores es del orden de 1.0 segundos.

El coeficiente de fricción longitudinal f_l para una velocidad de 60 km/h, de acuerdo con la tabla 4.3, es 0.34.

Por lo tanto, la distancia de parada en este caso, según la ecuación (4.19), es:

$$D_p = v_o(t_{pr}) + \frac{v_o^2 - v_f^2}{254(f_l \pm p)} = (60\ km/h)(1.0\ s)\left(\frac{1{,}000\ m}{1\ km}\right)\left(\frac{1\ h}{3{,}600\ s}\right) + \frac{(60)^2 - (0)^2}{254(0.34 + 0)}$$

$$= 58.35\ m$$

Figura 4.9 *Los intervalos amarillo y todo rojo en intersecciones con semáforos*

Naturalmente cualquier otro vehículo más alejado de esta distancia, con mayor certeza será capaz de detenerse de manera segura. Sin embargo, si éste se encuentra dentro de esta distancia, cuando aparezca el amarillo, no se detendrá con seguridad, por lo que se le permitirá cruzar a través de la intersección también de manera segura antes de liberar el flujo de la siguiente fase (*Fase 2*), esto es, el vehículo *C* del acceso Sur.

Más aún, en la situación más crítica, supóngase que el vehículo *B* decide continuar su marcha, de tal manera que cuando llega a la línea de ALTO, el semáforo ya despliega la luz roja. No hay duda que éste vehículo cruzó la intersección en rojo. Con el propósito de que este vehículo *B* ("infractor"), cruce y despeje la intersección con seguridad, la apertura de la luz verde para el vehículo *C* en la *Fase 2* es retardada un poco prolongando su intervalo rojo. Como se puede observar en el diagrama de fases de la parte c) de la figura 4.9, a este intervalo se le conoce como intervalo *todo rojo* o intervalo de *despeje*. Recibe el nombre de todo rojo, debido precisamente a que las indicaciones de luz en todos los semáforos son rojas.

En términos generales, si se supone que el vehículo *B* se aproxima a una velocidad uniforme v_0 y cruza la intersección con esta misma velocidad, entonces el intervalo entreverde o intervalo de cambio de fase, es:

$$Entreverde = Amarillo + Todo\ Rojo = \frac{Distancia}{Velocidad}$$

$$y = A + TR = \left(\frac{D_p}{v_0}\right) + \left(\frac{w + W + L}{v_0}\right) \tag{4.20}$$

Donde:

y = entreverde o intervalo de cambio de fase
A = indicación de luz amarilla o intervalo de cambio de verde a rojo
TR = intervalo todo rojo o de despeje
D_p = distancia recorrida en amarillo
v_0 = velocidad de aproximación y cruce
w = ancho del cruce peatonal
W = ancho de la intersección que se cruza
L = longitud media de los vehículos

Para propósitos del ejemplo, supóngase también que el ancho del cruce peatonal es de 3.00 metros, el ancho de la calle transversal de 14.00 metros y la longitud media de los vehículos de 5.50 metros. Por lo tanto, según la ecuación (4.20), se tiene:

$$y = A + TR = \left(\frac{D_p}{v_0}\right) + \left(\frac{w + W + L}{v_0}\right) = \left(\frac{58.35\ m}{60\ km/h}\right)3.6 + \left(\frac{3.00\ m + 14.00\ m + 5.50\ m}{60\ km/h}\right)3.6$$

$$= A + TR = 3.50\ s + 1.35\ s$$
$$= 4.85\ s$$

Como se puede apreciar el intervalo amarillo *A* para la *Fase 1* es de 3.50 segundos y el intervalo todo rojo *TR* entre la *Fase 1* y la *Fase 2* es de 1.35 segundos, que por seguridad y redondeo se pueden llevar a 4 y 2 segundos, respectivamente. Es importante aclarar que estos 2 segundos se le asignan a la *Fase 2*.

En el capítulo 13, sobre semáforos, se presenta otro procedimiento para el cálculo de estos intervalos, como parte de la distribución de los tiempos dentro del ciclo del semáforo para cada una de las fases.

Ejemplo 4.4

El esquema de la figura 4.10, muestra a un vehículo en un frenado de emergencia sobre una carretera que tiene una pendiente descendente del 4%. Inicialmente el vehículo derrapa sobre la calzada en pavimento asfáltico dejando huellas en una longitud de 38 metros y, finalmente, sobre el acotamiento en grava, donde se detuvo dejando huellas en una longitud de 15 metros. Por otros experimentos realizados se sabe que el coeficiente de fricción es de 0.50 sobre superficie asfáltica y de 0.60 sobre grava. Se desea conocer la velocidad del vehículo al inicio del frenado de emergencia y en el momento de abandonar la calzada.

Figura 4.10 Vehículo en un frenado de emergencia

De acuerdo a la figura 4.10, sean:

v_1 = velocidad en el punto *1*: empieza el derrapamiento (a calcular)
v_2 = velocidad en el punto *2*: abandona la calzada (a calcular)
v_3 = velocidad en el punto *3*: se detiene, $v_3 = 0$
d_{f_a} = distancia de frenado (huellas) en la calzada sobre pavimento asfáltico
d_{f_g} = distancia de frenado (huellas) en el acotamiento sobre grava
f_{l_a} = coeficiente de fricción longitudinal sobre asfalto, $f_{l_a} = 0.50$
f_{l_g} = coeficiente de fricción longitudinal sobre grava, $f_{l_g} = 0.60$
p = pendiente longitudinal de la carretera, $p = -0.04$

En los frenados de emergencia, prácticamente el tiempo de percepción-reacción del conductor es cero, precisamente por que al tratarse de una situación de emergencia, súbitamente el conductor coloca el pie en el pedal del freno, produciéndose huellas sobre la superficie de rodamiento. De allí que, la expresión a utilizar es el segundo término de la distancia de parada, dado por la ecuación (4.16):

$$d_f = \frac{v_o^2 - v_f^2}{254(f_l \pm p)}$$

Velocidad al abandonar la calzada: v_2

Para el tramo $2-3$ sobre el *acotamiento*, se tiene:

$$d_{f_g} = \frac{v_2^2 - v_3^2}{254(f_l \pm p)} = \frac{v_2^2 - 0^2}{254(f_{l_g} - p)}$$

De donde, despejando v_2:

$$v_2 = \sqrt{254(f_{l_g} - p)\, d_{f_g}} = \sqrt{254(0.60 - 0.04)15}$$

$$= 46.2\ km/h$$

Velocidad al inicio del frenado de emergencia: v_1

Para calcular la velocidad del vehículo al inicio del derrapamiento, se utiliza de nuevo la ecuación (4.16), aplicada en el tramo $1-2$ sobre la *calzada*, así:

$$d_{f_a} = \frac{v_1^2 - v_2^2}{254(f_{l_a} - p)}$$

Despejando v_1, queda:

$$v_1 = \sqrt{254(f_{l_a} - p)\, d_{f_a} + v_2^2} = \sqrt{254(0.50 - 0.04)38 + 46.2^2}$$

$$= 81.1\ km/h$$

Ejemplo 4.5

El esquema de la Figura 4.11 se refiere a una prueba de frenados de emergencia, para los cuales se tiene que:

El vehículo de prueba A deja huellas sobre la superficie de rodamiento en una longitud de 16 metros, desde una velocidad de 48 km/h hasta detenerse. El vehículo de prueba B también es sometido a frenado sobre la misma superficie de rodamiento, dejando huellas en una longitud de 46 metros hasta detenerse. Se quiere conocer la velocidad inicial del segundo vehículo, sabiendo que el experimento se realizó sobre una pendiente longitudinal ascendente del 2%.

Para la figura 4.11, sean:

$v_{o_A} =$ velocidad inicial del vehículo de prueba A, $v_{o_A} = 48\ km/h$
$v_{f_A} =$ velocidad final del vehículo de prueba A, $v_{f_A} = 0$
$v_{o_B} =$ velocidad inicial del vehículo de prueba B (a calcular)
$v_{f_B} =$ velocidad final del vehículo de prueba B, $v_{f_B} = 0$

d_{f_A} = distancia de frenado (huellas) del vehículo de prueba A, $d_{f_A} = 16\ m$
d_{f_B} = distancia de frenado (huellas) del vehículo de prueba B, $d_{f_B} = 48\ m$
p = pendiente longitudinal de la superficie de prueba, $p = +0.02$

Figura 4.11 Vehículos de prueba en frenados de emergencia

La velocidad inicial del vehículo de prueba B, v_{o_B}, se calcula a partir de la ecuación (4.16):

$$d_{f_B} = \frac{v_{o_B}^2 - v_{f_B}^2}{254(f_l + p)} = \frac{v_{o_B}^2 - 0^2}{254(f_l + p)}$$

$$v_{o_B} = \sqrt{254(f_l + p)\, d_{f_B}}$$

En la expresión anterior no se conoce el coeficiente de fricción longitudinal f_l. Este se puede calcular con la misma ecuación (4.16), aplicada al vehículo de prueba A, así:

$$d_{f_A} = \frac{v_{o_A}^2 - v_{f_A}^2}{254(f_l + p)} = \frac{v_{o_A}^2 - 0^2}{254(f_l + p)}$$

$$f_l = \frac{v_{o_A}^2}{254\left(d_{f_A}\right)} - p = \frac{48^2}{254(16)} - 0.02$$

$$= 0.547$$

Por lo tanto, en la expresión planteada para v_{o_B}, se tiene:

$$v_{o_B} = \sqrt{254(f_l + p)\, d_{f_B}} = \sqrt{254(0.547 + 0.02)48}$$

$$= 83.1\ km/h$$

Puede observarse, que este ejemplo indica un método para determinar coeficientes de fricción longitudinal entre llantas y superficie de rodamiento para el caso de frenados de emergencia. A su vez, tanto este ejemplo como el anterior, también presentan procedimientos para determinar las velocidades aproximadas con las que circulan los vehículos comprometidos en accidentes o colisiones y de esta manera definir responsabilidades o culpabilidades.

4.8 Problemas propuestos

4.1 Un conductor que viaja a 86 km/h sobre un pavimento mojado, observa al frente un obstáculo sobre la calzada a una distancia de 135 metros, y detiene su vehículo justamente a tiempo al lado del obstáculo. Suponiendo un tiempo de percepción-reacción normal, determine la pendiente de la rasante.

4.2 La velocidad límite máxima en un tramo de carretera a nivel es de 80 km/h. Un conductor que circula en dicho tramo sobre pavimento mojado ve a 135 metros una señal de protección de una obra, sin embargo, su vehículo tiene una colisión con ella a una velocidad de 55 km/h. Determine en cuánto ha sobrepasado la velocidad límite.

4.3 Un conductor que desciende en su vehículo a una velocidad de 90 km/h en una pendiente del 5%, observa hacia delante un accidente que involucra el volcamiento de un camión que bloquea toda la calzada. El conductor logra detener su vehículo 10 metros antes del camión accidentado. ¿A qué distancia del camión se encontraba su vehículo cuando el conductor observó el accidente?

4.4 En la aproximación a una caseta de cobro es necesario ubicar una señal informativa que diga: CASETA DE COBRO ADELANTE, PREPÁRESE A PARAR. Se sabe además: que la cola máxima observada en la caseta de cobro es de 8 vehículos (aproximadamente 45 metros de longitud), que los vehículos se aproximan a la caseta a una velocidad de 90 km/h, que el tiempo de percepción-reacción ante la presencia de una señal es de 2.0 segundos y que la rasante es a nivel. ¿A qué distancia de la caseta deberá ser colocada la señal, si puede ser leída a 90 metros?

4.5 En una prueba de frenado en un tramo de carretera, se determina que un vehículo que circula a 90 km/h, necesita 10 metros más para detenerse cuando desciende que cuando asciende. Determine la pendiente longitudinal del tramo donde se realiza la prueba.

4.6 Un conductor que viaja a 90 km/h en una autopista, intenta salir por un enlace de divergencia (salida) de velocidad máxima 50 km/h. ¿En qué punto sobre la autopista el conductor deberá colocar el pie en el pedal del freno para reducir su velocidad y salir por el enlace justamente a 50 km/h, si el tramo de autopista es completamente a nivel (horizontal)?

4.7 Un camión que circula a 40 km/h, se aproxima a una intersección que tiene una señal de ALTO, tal que cuando se encuentra a 20 metros de la señal empieza a detenerse con una desaceleración de 4.3 m/s/s. ¿Será capaz el camión de parar a tiempo?

4.8 Un vehículo que se encontraba en un frenado de emergencia, derrapa inicialmente en un puente sobre una superficie de concreto ($f_{l_c} = 0.70$) dejando huellas en una longitud de 20 metros. Enseguida, al salir del puente, derrapa sobre la superficie asfáltica ($f_{l_a} = 0.50$) de la calzada en una longitud de 30 metros. Finalmente, luego de salirse de la calzada, derrapa en el acotamiento sobre grava ($f_{l_g} = 0.60$) dejando huellas en una longitud de 15 metros, donde se detuvo. 1) Dibuje un esquema de la situación presentada. 2) Determine la velocidad del vehículo al inicio del derrapamiento, si éste circulaba en un tramo a nivel. 3) Determine la velocidad al inicio del derrapamiento si el vehículo circulaba en una pendiente descendente del 5%. 4) Lo mismo si circulaba en una pendiente ascendente del 5%. 5) Comente y concluya comparando los resultados anteriores.

Referencias bibliográficas

[1] Roess, Roger P.; Prassas, Elena S. and Mcshane, William R. *Traffic Engineering*. Third edtion, Pearson Prentice Hall, New Jersey, 2004.

[2] Transportation Research Board. *Highway Capacity Manual*. National Research Council, Washington, D.C., 2000.

[3] Cal y Mayor y Asociados. *Manual de Planeación y Diseño para la Administración del Tránsito y el Transporte: Tomo III, Tránsito*. Segunda edición, Alcaldía Mayor de Bogotá, D.C., Secretaría de Tránsito y Transporte, Bogotá, D.C., 2005.

[4] American Association of State Highway and Transportation Officials. *Guide for the Planning, Design, and Operation of Pedestrian Facilities*. Washington, D.C., 2004.

[5] Garber, Nicholas J. and Hoel, Lester A. *Traffic and Highway Engineering*. Third edition, University of Virginia, Brooks/Cole, Thomson Learning, Pacific Grove, California, 2002.

[6] www.tierramerica.net/2001/0624/articulo.shtml. García, Maria Isabel. *Reportaje: En el Reino de la Ciclovía*. Internacional Press Service.

[7] http://es.wikipedia.org/wiki/Ciclov%C3%ADa

[8] http://es.wikipedia.org/wiki/Ciclorrutas

[9] www.sma.df.gob.mx/corenader/tur-alter/servicios/ciclovia/ciclovia2.htm

[10] http://www.bicitekas.org

[11] http://es.wikipedia.org/wiki/Ciclismo_urbano. J. Dekoster, U. Schollaert. *En Bici Hacia Ciudades Sin Malos Humos*. Oficina de Publicaciones Oficiales de las Comunidades Europeas, Luxemburgo, 2000.

[12] Kearney, Paul. *Family Safety*. Selecciones del Reader's Digest. Mayo 1966.

[13] American Association of State Highway and Transportation Officials. *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets*. Washington, D.C., 2004.

[14] American Association of State Highway and Transportation Officials. *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets*. Washington, D.C., 1990.

[15] Mannering, Fred L.; Kilareski, Walter P. and Washburn, Scott S. *Principles of Highway Engineering and Traffic Analysis*. Third edtion, John Wiley & Sons Inc., New Jersey, 2005.

5

Vehículo

5.1 Registro mundial

Debido a que el vehículo es uno de los cinco elementos primordiales del tránsito, es necesario estudiarlo con cierto detalle.

Ya se vio en la primera parte de este texto, en los antecedentes históricos y en el problema del tránsito, el desarrollo que el vehículo ha tenido; ahora se va a citar como parte principal de este capítulo, la evolución que a través de los años ha experimentado el número de automóviles en el mundo, tal como lo muestra la tabla 5.1, desde el año 1939 hasta el año 2004.

A su vez, en la tabla 5.2 se muestra la variación de los automóviles desde el año 1997 hasta el año 2004, por zonas geográficas.

En números redondos, según estos registros mundiales de automóviles, en el año 1939 existían alrededor de 45 millones de automóviles y ya en el año 2004 alrededor de 610 millones, casi 14 veces más, los cuales se han venido incorporado a nuestra civilización desde los inicios del siglo XX hasta los inicios del siglo XXI.

Se observa también que las zonas geográficas de mayor producción de automóviles son la Unión Europea y América del Norte, que en el año 2004 era de 163,020,000 y 157,660,000 automóviles, respectivamente. Por otro lado, la zona geográfica de menor producción, tradicionalmente ha sido América del Sur con 24,110,000 automóviles en el año 2004.

Igualmente, la tabla 5.3 presenta para los años 1989, 2002 y 2004 el censo mundial de vehículos en términos de automóviles, camiones y autobuses para las diferentes zonas geográficas del mundo. De nuevo se observa, que la mayor cantidad de vehículos se encuentran concentrados en la Unión Europea y en América del Norte, y la menor en América del Sur.

Es conveniente citar la estadística mundial de vehículos, para tener un conocimiento más amplio de la forma como la "era motorizada" afecta los diferentes países, o de cómo el progreso de cada país afecta su "motorización". Haciendo una pequeña comparación de la relación "habitantes por vehículo", en algunos de los principales países del mundo, se puede tener un cuadro más completo del estado que guarda el transporte motorizado.

Tabla 5.1 Evolución del número de automóviles en el mundo

Año	Número de automóviles en el mundo
1939 (1)	44,629,284
1950 (1)	63,242,895
1960 (1)	121,541,265
1961 (1)	129,383,214
1963 (2)	147,572,967
1964 (3)	161,752,885
1975 (4)	320,841,457
1989 (1)	406,270,606
1997 (5)	509,130,000
1998 (5)	500,740,000
1999 (5)	541,900,000
2000 (5)	562,100,000
2001 (5)	541,060,000
2002 (5)	556,390,000
2003 (5)	579,170,000
2004 (5)	610,300,000

Fuente:
(1): *Revista: El Automóvil Internacional.*
(2): *Almanaque Issue: World Statistics Automotive News.*
(3): *International Road Federation.* Washington.
(4): *Almanaque Mundial 1974.*
(5): *World Motor Vehicle Production.* Selected Countries, 2002.
Auto Industry Statistics Production World. UK, 2004.

Tabla 5.2 Variación mundial de los automóviles por zonas geográficas

Zona	1997	1998	1999	2000
América del Norte	153,490,000	151,470,000	170,370,000	171,500,000
América del Sur	24,100,000	19,350,000	15,980,000	19,780,000
Unión Europea	149,370,000	160,750,000	164,750,000	166,480,000
Resto de Europa	24,430,000	25,390,000	27,460,000	29,540,000
Japón	100,110,000	95,440,000	92,620,000	94,840,000
Corea del Sur	27,540,000	19,230,000	28,010,000	30,660,000
Asia, Oceanía y África	30,090,000	29,110,000	42,710,000	49,300,000
Totales	509,130,000	500,740,000	541,900,000	562,100,000

Zona	2001	2002	2003	2004
América del Norte	154,670,000	163,690,000	158,740,000	157,660,000
América del Sur	20,060,000	19,060,000	19,220,000	24,110,000
Unión Europea	167,050,000	163,840,000	162,870,000	163,020,000
Resto de Europa	27,240,000	28,510,000	30,930,000	38,160,000
Japón	91,710,000	95,660,000	95,020,000	97,300,000
Corea del Sur	29,070,000	30,960,000	31,270,000	34,250,000
Asia, Oceanía y África	51,260,000	54,670,000	81,120,000	95,800,000
Totales	541,060,000	556,390,000	579,170,000	610,300,000

Fuente:
World Motor Vehicle Production. Selected Countries, 2002.
Auto Industry Statistics Production World. UK, 2004.

Tabla 5.3 Censo mundial de vehículos (automóviles, camiones y autobuses) por zonas geográficas

Zona Geográfica	Año 1989		
	Automóviles	Camiones y autobuses	Suma
América del Norte	157,865,000	48,798,000	206,663,000
Europa Occidental	134,207,314	17,478,903	151,686,217
Europa Oriental	30,406,008	12,909,627	43,315,635
Pacífico	9,089,946	2,459,958	11,549,904
Extremo Oriente	40,702,601	32,528,016	73,230,617
Caribe	2,199,875	557,132	2,857,007
Medio Oriente	7,600,000	4,243,070	11,843,070
África	7,531,653	4,060,109	11,591,762
América Central y de Sur	23,676,669	8,944,801	32,621,470
Totales	408,157,354	129,692,422	535,092,769

Zona Geográfica	Año 2002		
	Automóviles	Camiones y autobuses	Suma
América del Norte	163,690,000	3,440,000	167,140,000
América del Sur	19,060,000	980,000	20,040,000
Unión Europea	163,840,000	4,870,000	168,710,000
Resto de Europa	28,510,000	1,000,000	29,510,000
Japón	95,660,000	6,910,000	102,570,000
Corea del Sur	30,960,000	510,000	31,480,000
Asia, Oceanía y África	54,670,000	15,820,000	70,490,000
Totales	556,390,000	33,530,000	589,940,000

Zona Geográfica	Año 2004		
	Automóviles	Camiones y autobuses	Suma
América del Norte	157,660,000	4,990,000	162,650,000
América del Sur	24,110,000	1,510,000	25,620,000
Unión Europea	163,020,000	5,520,000	168,540,000
Resto de Europa	38,160,000	1,590,000	39,750,000
Japón	97,300,000	7,820,000	105,120,000
Corea del Sur	34,250,000	440,000	34,690,000
Asia, Oceanía y África	95,800,000	9,480,000	105,280,000
Totales	610,300,000	31,350,000	641,650,000

Fuente:
Revista: El Automóvil Internacional: Censo Mundial de Automotores. 1989.
World Motor Vehicle Production. Selected Countries, 2002.
Auto Industry Statistics Production World. UK, 2004.

En la tabla 5.4, se muestra la relación de habitantes por vehículo, incluyendo automóviles, autobuses y camiones, en el año 2002, en los países con mayor número de vehículos en el mundo.

Se puede sacar una conclusión: los países más adelantados son los que han podido incorporar a su economía la mayor cantidad de vehículos. Casi se puede afirmar que la relación de habitantes por vehículo es uno de los indicadores para apreciar el progreso de un país, tanto en su transporte, como en su economía en general. Sin duda, los países industrializados tendrán las relaciones de habitantes por vehículo más bajas, en tanto que los países en vía de desarrollo tendrán relaciones de habitantes por vehículo más elevadas.

Tabla 5.4 Relación de habitantes por vehículo, en los países del mundo con mayor número de vehículos, en el año 2002

Zona	Automóviles	Camiones y autobuses	Suma	Habitantes	Hab/veh
1. Estados Unidos	120,190,000	2,610,000	122,800,000	280,562,000	2.3
2. Japón	95,660,000	6,910,000	102,570,000	126,975,000	1.2
3. Alemania	51,651,017	798,983	52,450,000	83,252,000	1.6
4. Francia	36,985,537	944,463	37,930,000	59,766,000	1.6
5. China	21,979,330	10,530,670	32,510,000	1,284,304,000	58.4
6. Corea del Sur	30,960,000	510,000	31,480,000	48,324,000	1.6
7. España	28,192,190	1,357,810	29,550,000	40,077,000	1.4
8. Canadá	25,820,000	470,000	26,290,000	31,902,000	1.2
9. África	18,496,011	3,753,989	22,250,000	756,722,000	40.9
10. Reino Unido	18,764,324	445,676	19,210,000	59,758,000	3.1
11. México	17,690,000	360,000	18,050,000	103,400,000	5.7
12. Brasil	17,122,000	808,000	17,930,000	176,030,000	9.8
13. Italia	14,574,931	695,069	15,270,000	57,716,000	3.8
14. Rusia	12,568,101	551,899	13,120,000	144,979,000	11.1
15. Bélgica	10,285,205	274,795	10,560,000	10,275,000	1.0
16. India	8,013,192	906,808	8,920,000	1,045,845,000	130.5
17. Checoslovaquia	4,456,145	13,855	4,470,000	5,403,000	1.2
18. Turquía	3,139,784	330,216	3,470,000	67,309,000	21.4
19. Australia	3,259,614	180,386	3,440,000	19,547,000	6.0
20. Taiwán	2,921,471	448,529	3,370,000	22,548,000	7.7
21. Polonia	3,046,888	53,102	3,100,000	38,625,000	12.7
22. Suecia	2,672,250	87,750	2,760,000	8,877,000	3.3
23. Portugal	2,352,974	157,026	2,510,000	10,075,000	4.3
24. Holanda	2,196,849	113,151	2,310,000	16,068,000	7.3

Fuente:
Auto Industry Statistics Production World. UK, 2004.
World Motor Vehicle Production. Selected Countries, 2002.
National Publication. Bureau of Transportation Statistics, 2004.
Wikipedia Densidad de Población. 2002-2004.
Banco Mundial Estadísticas. 2002.

Se observa que Bélgica, Japón, Canadá, Checoslovaquia, España, Alemania, Francia, Corea del Sur y Estados Unidos, siguen siendo los países que van a la vanguardia en el nivel de motorización. Por otro lado, en esta jerarquía el país con menor grado de motorización es la India. A nivel latinoamericano, se destacan México y Brasil, con grados de motorización relativamente altos.

En conclusión, es indispensable que cada país facilite su transporte, que lo mecanice al máximo para que progrese, para que puedan transportarse los bienes de consumo, desde las fuentes de producción hasta los mercados; para que los bienes manufacturados puedan ir a los pueblos más apartados; para que las comodidades se puedan distribuir en todo el país, etc. Aún se puede reducir más la actual relación de habitantes por vehículo en la mayoría de los países. Entonces, no sólo es inevitable que aumente el número de vehículos cada año, sino que es lo deseable, lo conveniente. Por lo tanto, el segundo elemento componente del tránsito, *El Vehículo*, irremediablemente seguirá en aumento.

5.2 Estadística de México

Según la Dirección General de Estadísticas de México, en cuanto a población y número de vehículos, se reportan para toda la República los siguientes datos:

En el año 1930, con 16,588,522 habitantes, había 88,443 vehículos, lo cual da una relación de 187.6 habitantes por vehículo. Vino la depresión económica, que se prolongó hasta el año 1933 bajando el número de vehículos, por lo que en el año 1932 se tuvo una relación elevada de 193.0 habitantes por vehículo. De allí en adelante empezó a variar, arrojando 150.0 habitantes por vehículo en el año 1938. Hasta el año 1946, la cifra de habitantes por vehículo era superior a 100.0, específicamente 114.0 en ese año. Desde entonces ha bajado a una cifra menor de 100.0. En el año 1975, con aproximadamente 60,145,000 habitantes y 3,586,000 vehículos, había una relación de 16.8 habitantes por vehículo. Hacia el año 1989 la relación había bajado a 16.0, y ya en el año 2002 la relación era de 5.7. Todos estos cambios graduales en el tiempo, ponen de manifiesto el nivel de motorización cada vez más elevado en la República Mexicana.

Por otra parte, en la tabla 5.5, se muestra el número de vehículos en el Distrito Federal, desde el año 1925 hasta el año 2002. Desde el año 1925 al año 1960, los autobuses experimentaron fluctuaciones con tendencias a incrementarse. Del año 1960 al año 1980, se da un crecimiento constante en el número total de vehículos.

Tabla 5.5 Vehículos en el Distrito Federal

Años	Total vehículos	Automóviles	Autobuses	Camiones	Motocicletas
1925	21,209	15,063	2,622	3,059	465
1930	31,994	22,487	2,281	7,068	368
1935	29,158	22,686	1,616	4,502	354
1940	48,134	35,520	2,255	8,616	1,743
1945	59,548	45,304	2,621	9,809	1,815
1950	74,327	55,014	4,280	12,895	2,138
1955	150,584	110,339	6,958	27,685	5,602
1960	248,048	192,557	6,910	35,161	13,410
1965	379,204	313,055	6,993	45,711	13,445
1970	717,672	589,615	9,890	76,500	41,667
1975	1,199,471	1,004,154	12,898	107,954	74,465
1980	1,869,808	1,101,867	14,487	187,205	66,249
1985	1,590,181	1,416,310	11,661	137,877	24,333
1990	2,274,614	2,044,940	10,864	196,489	22,321
1995	2,093,510	1,801,940	17,863	234,991	38,716
2000	2,194,411	1,806,321	30,002	279,777	78,311
2001	2,118,196	1,726,085	32,167	287,664	72,280
2002	2,431,112	1,985,926	49,407	311,361	84,418

Fuente:
Dirección General de Estadística, SPP.
Anuario de Transporte y Vialidad de la Ciudad de México. CGT, 1989.
Tabla Estadística de Parque Vehicular Anual. INEGI, 2002.

A consecuencia de la crisis vivida en México en los años 1982 y 1983, se presenta un descenso bastante representativo en el número de vehículos, que en los años

siguientes presenta una recuperación lenta. En el año 1975 se rebasa el millón de automóviles, que continúa en ascenso hasta llegar a los dos millones en el año 1990.

Con los camiones, también se nota un ascenso, con ciertas fluctuaciones, siendo éstas más notorias en los primeros años. En cuanto a las motocicletas para el año 1985 se aprecia una fuerte caída, la cual prevalece en el mismo orden hasta el año 1990.

5.3 Inspección del vehículo

Una *inspección mecánica* rigurosa de los vehículos, trae ventajas al estado general de los vehículos, como sigue:

- ⇨ Mejora su estado natural.
- ⇨ Lo conserva a un mayor nivel comercial.
- ⇨ Ofrece la oportunidad de revisar el número de serie del motor, verificándolo contra la factura y permite también cooperar en la aplicación de la ley en algunos casos.
- ⇨ Mejora la calidad de la mano de obra en su reparación.
- ⇨ Proporciona una excelente oportunidad para informar a los conductores sobre la condición del vehículo y su responsabilidad bajo esas circunstancias.

Según la experiencia de servicios en asociaciones automovilísticas de servicio, las causas principales de falla de un vehículo ocurren por el estado de las llantas, los frenos, la suspensión delantera, la dirección, las luces, etc. La labor preventiva puede ser significativa a través de una revisión rápida, cada vez que haya un contacto de la autoridad con el usuario, cuando menos en vehículos de servicio público. Sea cual sea el tipo de vehículo se puede hacer una revisión de cinco minutos, que ayudará al usuario y al agente de la ley a conocer las condiciones del vehículo, al grado que se pueda determinar si conviene dejarlo seguir su camino o prohibirle el paso en la carretera.

Una sencilla revisión ocular de las llantas determinará si ese vehículo puede seguir su camino con las que lleva. La presencia de llantas lisas, o bien, aberturas laterales o en el piso de la misma, indicará peligro. Tratándose de vehículos de servicio público, debe obligarse al operador a corregir el defecto, antes de seguir adelante. Por lo que respecta a los frenos, hay una sencilla regla para saber si el vehículo puede seguir con seguridad o no. Si al oprimir el pedal del freno, se llega a una distancia menor de 3 centímetros del tablero del piso, ese freno necesita revisión urgente. Las fallas de la suspensión delantera casi siempre pueden observarse en las ruedas "abiertas", o en el desgaste anormal de las llantas delanteras. Los casos críticos pueden significar desgaste peligroso.

En lo que tiene que ver con la dirección, una simple operación con la mano puede probar su sensibilidad para determinar si es correcta o no. Si el volante del vehículo gira más de ¼ de círculo sin que las ruedas se muevan, debe ir al taller. El volante debe ser lo suficientemente sensible para que al menor movimiento accionen las ruedas.

Las luces pueden ser revisadas con toda facilidad verificando el cambio de luces altas, bajas y traseras. La simple ausencia de luz trasera, debe justificar que se impida el tránsito a un vehículo. Naturalmente, la ausencia o defecto de las luces delanteras también facultan al policía para negar la circulación del vehículo.

En cuanto a la emisión de gases contaminantes, la *verificación vehicular* es una actividad de control de la contaminación atmosférica que se realiza en diversas partes del mundo, principalmente en las ciudades con un gran número de vehículos o altos índices de contaminación atmosférica. Diversos países europeos, los Estados Unidos, Canadá, Japón y países asiáticos de la cuenca del Pacífico, aplican procedimientos de verificación vehicular similares a los que se utilizan en México.

En términos generales hay tres tipos de organización y administración de programas de verificación o inspección vehicular:

- *Sistema Centralizado:* este sistema consiste en realizar la verificación vehicular en centros especializados pertenecientes a una sola empresa privada o del gobierno. En ocasiones, la verificación vehicular se realiza en forma asociada a una inspección de las condiciones de seguridad de los vehículos (frenos, luces, suspensión, etc.). Ciudades como Denver, Phoenix, Tokio, Jakarta, Madrid y Colonia, poseen este sistema.

- *Sistema Descentralizado:* en este sistema la verificación se realiza a través de centros particulares, en su mayoría talleres mecánicos con una sola línea de verificación. Ciudades como Los Ángeles y Nueva York poseen este tipo de organización descentralizada. En el caso de la ciudad de Nueva York, una empresa administra el sistema a nombre de la alcaldía.

- *Sistema Híbrido:* la Zona Metropolitana de la Ciudad de México posee un sistema híbrido de verificación vehicular, donde los vehículos de uso intensivo, deben verificar obligatoriamente en verificentros y los automovilistas particulares lo pueden hacer en verificentros si tienen placas del Distrito Federal o en talleres mecánicos que aún prestan servicio a vehículos con placas del Estado de México. Alemania y Estados Unidos están diseñando sistemas híbridos para algunas ciudades donde las primeras verificaciones, de los autos más limpios, se realizan en talleres mecánicos; los autos viejos y los rechazados deberán asistir a verificentros.

El procedimiento de verificación consiste en tres etapas:

- Inspección visual a los dispositivos y sistemas para el control de la contaminación instalados en los vehículos automotores: sistema de escape, tapón del tanque de combustible, tapón del depósito de aceite, bayoneta del nivel de aceite, ventilación positiva del cárter, filtro de carbón activado, filtro de aire y tensión de bandas.

- Prueba de revisión visual de humos mediante una prueba estática en marcha crucero: humo azul, humo negro. La presencia de humo azul es indicativa de la presencia de aceite en el sistema de combustión y la emisión de humo negro es indicativa de un exceso de combustible no quemado. Por tanto, cualquiera de las dos indica altos niveles de emisión de hidrocarburos entre otros contaminantes.

- Medición de las emisiones contaminantes. La medición de las emisiones contaminantes de hidrocarburos y monóxido de carbono se realiza mediante una prueba estática, que consiste en una prueba en marcha crucero y una prueba en marcha lenta en vacío.

5.4 Características de los vehículos de proyecto

En general, los vehículos se clasifican en vehículos *ligeros*, vehículos *pesados* y vehículos *especiales* [1].

Los vehículos *ligeros* son vehículos de pasajeros y/o carga, que tienen dos ejes y cuatro ruedas. Se incluyen en esta denominación los automóviles, camperos, camionetas y las unidades ligeras de pasajeros y carga.

Los vehículos *pesados* son unidades destinadas al transporte masivo de pasajeros o carga, de dos o más ejes y de seis o más ruedas. En esta denominación se incluyen los autobuses y los camiones.

Los vehículos *especiales* son aquellos que eventualmente transitan y/o cruzan las carreteras y calles, tales como: camiones y remolques especiales para el transporte de troncos, minerales, maquinaria pesada, maquinaria agrícola, bicicletas y motocicletas, y en general, todos los demás vehículos no clasificados anteriormente, tales como vehículos deportivos y vehículos de tracción animal.

En la tabla 5.6, se presenta la clasificación general vigente de los vehículos, con su número de ejes y simbología.

Las normas que rigen el proyecto de calles y carreteras se fundamentan en gran parte en las dimensiones y características de operación de los vehículos que por ellas circulan.

El *vehículo de proyecto*, es aquel tipo de vehículo hipotético, cuyo peso, dimensiones y características de operación son utilizados para establecer los lineamientos que guiarán el proyecto geométrico de las carreteras, calles e intersecciones, tal que éstas puedan acomodar vehículos de este tipo.

En general, para efectos de proyecto, se consideran dos tipos de vehículos de proyecto: los vehículos *ligeros* o livianos y los vehículos *pesados*, clasificados éstos en camiones y autobuses. Las principales características para su clasificación están referidas al radio mínimo de giro y aquellas que determinan las ampliaciones o sobreanchos necesarios en las curvas horizontales, tales como distancia entre ejes extremos, ancho total de la huella y vuelos delantero y trasero.

Tabla 5.6 Clasificación general de los vehículos

Tipo de vehículo		Número de ejes	Características	Símbolo
VEHÍCULOS LIGEROS	Automóviles	2	2 ejes y 4 ruedas	Ap
	Camperos		2 ejes y 4 ruedas	Ap
	Camionetas		2 ejes y 4 ruedas	Ac
VEHÍCULOS PESADOS	Camiones	2	Autobuses de 2 ejes y 6 ruedas	B
		2	Camiones grandes y pequeños de 2 ejes	C2
		3	Camiones en unidad rígida de 3 ejes	C3
			Camiones con 2 ejes en el tractor y 1 eje en el semi-remolque	T2-S1
		4	Camiones con 2 ejes en el tractor y 2 ejes en el semi-remolque	T2-S2
		5	Camiones con 3 ejes en el tractor y 2 ejes en el semi-remolque	T3-S2
			Camiones con 2 ejes en el tractor, 1 eje en el semi-remolque y 2 ejes en el remolque	T2-S1-R2
			Otras combinaciones	
VEHÍCULOS ESPECIALES	Camiones y/o remolques especiales	Variable		
	Maquinaria agrícola			
	Bicicletas y motocicletas			
	Otros			

Fuente: SCT. *Manual de Proyecto Geométrico de Carreteras.* México, 1991.

La figura 5.1 en conjunto con la tabla 5.7, muestran las características de los vehículos de proyecto vigentes que deben tomarse en cuenta en el proyecto geométrico de carreteras, calles e intersecciones [1].

La denominación de los vehículos de proyecto está en función de la distancia que existe entre los ejes extremos; así, por ejemplo, el vehículo DE-335 representa un vehículo con una distancia entre sus ejes extremos de 335 centímetros, o lo que es lo mismo 3.35 metros.

El vehículo de proyecto se debe seleccionar de tal manera que represente un porcentaje significativo del tránsito que circulará por el futuro sistema vial. Las figuras 5.2, 5.3, 5.4, 5.5 y 5.6 ilustran las principales dimensiones de los vehículos de proyecto, así como sus radios de giro mínimo y las trayectorias de las ruedas para esos radios en ángulos de vuelta de 90° y 180°. Se asume que los vehículos describen los radios mínimos de giro a velocidades inferiores a 15 km/h.

En términos generales el *vehículo ligero* de proyecto puede ser utilizado en intersecciones menores en zonas residenciales, donde el número de vehículos que realizan vueltas no es significativo. También puede ser utilizado en intersecciones mayores que dispongan de carriles de estacionamiento y cruces peatonales demarcados, los cuales obligan el uso de radios pequeños en las esquinas aún aceptables. Igualmente, podrá ser utilizado en aquellas áreas urbanas con intersecciones a nivel sobre calles arteriales, siempre que se disponga de carriles de cambio de velocidad y que las vueltas de camiones sean ocasionales. De manera similar, se utiliza en aquellos sitios donde el principal generador de tránsito es un estacionamiento.

VEHÍCULO LIGERO

L = longitud total del vehículo
DE = distancia entre los ejes más alejados de la unidad
DET = distancia entre los ejes más alejados del tractor
DES = distancia entre la articulación y el eje del semirremolque
Vd = vuelo delantero
Vt = vuelo trasero
Tt = distancia entre los ejes del tándem del tractor
Ts = distancia entre los ejes del tándem del semirremolque
Dt = distancia entre el eje delantero del tractor y el primer eje del tándem
Ds = distancia entre el eje posterior del tándem del tractor y el eje delantero del tándem del semirremolque
A = ancho total del vehículo
EV = distancia entre las caras extremas de las ruedas (entrevía)
Ht = altura total del vehículo
Hc = altura de los ojos del conductor
Hf = altura de los faros delanteros
Hl = altura de las luces posteriores
? = ángulo de desviación del haz luminoso de los faros

VEHÍCULO PESADO

Figura 5.1 *Dimensiones de los vehículos ligeros y pesados de proyecto*
(Fuente: SCT. *Manual de Proyecto Geométrico de Carreteras.* México, 1991.)

Tabla 5.7 Características de los vehículos de proyecto

Características de los vehículos			Vehículos de proyecto tipo				
			DE-335	DE-450	DE-610	DE-1220	DE-1525
Longitud del vehículo (m)		L	5.80	7.30	9.15	15.25	16.78
Distancia entre ejes extremos del vehículo (m)		DE	3.35	4.50	6.10	12.20	15.25
Distancia entre ejes extremos del tractor (m)		DET	-	-	-	3.97	9.15
Distancia entre ejes del semirremolque (m)		DES	-	-	-	7.62	6.10
Vuelo delantero (m)		Vd	0.92	1.00	1.22	1.22	0.92
Vuelo trasero (m)		Vt	1.53	1.80	1.83	1.83	0.61
Distancia entre ejes tándem del tractor (m)		Tt	-	-	-	-	1.22
Distancia entre ejes tándem del semirremolque (m)		Ts	-	-	-	1.22	1.22
Distancia entre ejes interiores del tractor (m)		Dt	-	-	-	3.97	4.88
Distancia entre ejes interiores del semirremolque (m)		Ds	-	-	-	7.01	7.93
Ancho total del vehículo (m)		A	2.14	2.44	2.59	2.59	2.59
Entrevía del vehículo (m)		EV	1.83	2.44	2.59	2.59	2.59
Altura total del vehículo (m)		Ht	1.67	2.14-4.12	2.14-4.12	2.14-4.12	2.14-4.12
Altura de los ojos del conductor (m)		Hc	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14
Altura de los faros delanteros (m)		Hf	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61
Altura de los faros traseros (m)		Hl	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61
Ángulo de desviación del haz de luz de los faros		α	1°	1°	1°	1°	1°
Radio de giro mínimo (m)		Rg	7.32	10.40	12.81	12.20	13.72
Peso total (kg)	Vehículo vacío	Wv	2,500	10,000	17,000	25,000	30,000
	Vehículo cargado	Wc	5,000	10,000	17,000	25,000	30,000
Relación peso/potencia (kg/HP)		Wc/P	45	90	120	180	180

Vehículos representados por el de proyecto		Ap Ac	C2	B C3	T2-S1 T2-S2		T3-S2 Otros	
Porcentaje de vehículos del tipo indicado cuya distancia entre ejes extremos (DE) es menor que la del vehículo de proyecto	Ap, Ac	99	100	100	100		100	
	C2	30	90	99	100		100	
	C3	10	75	99	100		100	
	T2-S1	0	0	1	80		99	
	T2-S2	0	0	1	93	78	99	98
	T3-S2	0	0	1	18		90	
Porcentaje de vehículos del tipo indicado cuya relación peso/potencia es menor que la del vehículo de proyecto	Ap, Ac	98	100	100	100		100	
	C2	62	98	100	100		100	
	C3	20	82	100	100		100	
	T2-S1	6	85	100	100		100	
	T2-S2	6	42	98	98		98	
	T3-S2	2	35	80	80		80	

Fuente: SCT. *Manual de Proyecto Geométrico de Carreteras.* México, 1991.

Por lo general el *vehículo pesado* de proyecto se utiliza en terminales de pasajeros y de carga, donde se espera una alta circulación de autobuses y camiones, efectuando maniobras de ascenso y descenso de pasajeros y carga y descarga de mercancías.

Específicamente los *camiones* con *semirremolque* se pueden utilizar en autopistas y arterias rápidas, siempre que sea grande el número de movimientos de vuelta. Igualmente, estos vehículos se utilizan en áreas industrializadas.

En lo que respecta a los *autobuses*, éstos se pueden clasificar en autobuses *suburbanos*, *urbanos* y *articulados*. El vehículo de proyecto *autobús suburbano*, se utiliza en el proyecto de terminales de pasajeros. El vehículo de proyecto *autobús urbano* se utiliza en el diseño de intersecciones a través de las cuales se hayan designado rutas de transporte público. Y el vehículo de proyecto *autobús articulado* se utiliza en los corredores de transporte masivo de carriles exclusivos sólo-bus.

Las figuras 5.7, 5.8 y 5.9 ilustran las principales dimensiones de los vehículos de proyecto tipo autobús, así como sus radios de giro mínimo, el radio del centro del eje delantero y las trayectorias de las ruedas para esos radios en ángulos de vuelta de 90° y 180°, recomendados por la AASHTO [2].

Figura 5.2 *Características del vehículo de proyecto DE-335*

(Fuente: SCT. *Manual de Proyecto Geométrico de Carreteras.* México, 1991.)

Figura 5.3 *Características del vehículo de proyecto DE-450*

(Fuente: SCT. *Manual de Proyecto Geométrico de Carreteras.* México, 1991.)

Figura 5.4 *Características del vehículo de proyecto DE-610*

(Fuente: SCT. *Manual de Proyecto Geométrico de Carreteras.* México, 1991.)

Figura 5.5 *Características del vehículo de proyecto DE-1220*

(Fuente: SCT. *Manual de Proyecto Geométrico de Carreteras.* México, 1991.)

Figura 5.6 *Características del vehículo de proyecto DE-1525*
(Fuente: SCT. *Manual de Proyecto Geométrico de Carreteras.* México, 1991.)

La Secretaría de Comunicaciones y Transportes, publicó en el año 2003 un Proyecto de Norma Oficial Mexicana [3], relacionado con el peso y dimensiones máximas con los que pueden circular los vehículos de autotransporte que transitan en los caminos y puentes de jurisdicción federal. En dicho proyecto de norma, en la tabla 5.8 se presenta la clasificación propuesta de los vehículos según su tipo, número de ejes y llantas.

A su vez, la Publicación Técnica No. 244, titulada Recomendaciones de Actualización de Algunos Elementos del Proyecto Geométrico de Carreteras, elaborada por el Instituto Mexicano del Transporte de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes [4], analiza la normativa mexicana vigente y a raíz de una serie de mediciones realizadas a los vehículos que transitan por las carreteras nacionales, propone las dimensiones que deberían tener los nuevos vehículos de proyecto, tal como se ilustra en la tabla 5.9.

5.5 Radio y peralte de curvas

Las vueltas que se realizan a velocidades inferiores a los 15 km/h, se consideran como *vueltas a baja velocidad*. Esta situación se presenta generalmente en intersecciones agudas, donde el radio de las curvas es controlado por las huellas de giro mínimas de los vehículos.

Figura 5.7 *Características del vehículo de proyecto autobús suburbano*

(Fuente: AASHTO. *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets.* 2004.)

Figura 5.8 *Características del vehículo de proyecto autobús urbano*

(Fuente: AASHTO. *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets.* 2004.)

Figura 5.9 *Características del vehículo de proyecto autobús articulado*
(Fuente: AASHTO. *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets.* 2004.)

Se consideran como *vueltas a alta velocidad* aquellas que se efectúan a velocidades cercanas al 70% de la velocidad de proyecto. Esta condición se presenta en las curvas a campo abierto y en las curvas de los enlaces en intersecciones importantes, donde el radio de ellas es controlado por el peralte y la fricción lateral entre las llantas y la superficie de rodamiento.

Cuando un vehículo cambia su trayectoria de movimiento rectilíneo a curvilíneo, "se siente una fuerza" que tiende a conservar el movimiento en línea recta. A este impulso inicial se le llama erróneamente, *fuerza centrífuga*.

Un vehículo se sale de una curva por dos razones que pueden ocurrir independientemente, o simultáneamente: ya sea porque el *peralte*, de la curva no es suficiente para contrarrestar la velocidad o porque la *fricción* entre las ruedas y el pavimento falla y se produce el "derrape" o deslizamiento. Las principales causas por las que un vehículo derrapa en las curvas son debido a la presencia de hielo, arena y agua sobre el pavimento.

Tabla 5.8 Clasificación propuesta de los vehículos

Tipo de vehículo	Nomenclatura	Número de ejes	Número de llantas
Buses (B)	B2	2	6
	B3	3	8-10
	B4	4	10
Camión Unitario (C)	C2	2	6
	C3	3	8-10
Camión-Remolque (C-R)	C2-R2	4	14
	C3-R2	5	18
	C2-R3	5	18
	C3-R3	6	22
Tracto Camión-Articulado (T-S)	T2-S1	3	10
	T2-S2	4	14
	T3-S2	5	18
	T3-S3	6	22
Tracto Camión-Doblemente-Articulado (T-S-R)	T2-S1-R2	5	18
	T3-S1-R2	6	22
	T3-S2-R2	7	26
	T3-S2-R3	8	30
	T3-S2-R4	9	34
	T3-S3-R2	8	30

Fuente: SCT. *Proyecto de Norma Oficial Mexicana: PROY-NOM-012-SCT-2-2003.* México, 2003.

Tabla 5.9 Propuesta de vehículos de proyecto

Características de los vehículos		Vehículos de proyecto tipo			
		DE-335	DE-620	DE-750	DE-760
Longitud del vehículo (m)	L	5.80	12.00	13.60	12.09
Distancia entre ejes extremos del vehículo (m)	DE	3.35	6.20	7.49	7.62
Vuelo delantero (m)	Vd	0.92	2.36	2.40	1.27
Vuelo trasero (m)	Vt	1.53	3.44	3.71	3.20
Ancho total del vehículo (m)	A	2.14	2.55	2.60	2.44
Entrevía del vehículo (m)	EV	1.83	2.30	2.30	2.44
Longitud del remolque (m)	Lr	-	-	-	-
Altura total del vehículo (m)	Ht	1.67	3.54	3.80	4.10
Altura de los ojos del conductor (m)	Hc	1.07	2.12	2.32	2.50
Altura de los faros delanteros (m)	Hf	0.61	0.81	1.10	1.12
Altura de los faros traseros (m)	Hl	0.61	1.54	1.40	1.00
Ángulo de desviación del haz de luz de los faros	α	1°	1°	1°	1°
Radio de giro mínimo (m)	Rg	7.32	12.67	13.59	15.72
Relación peso/potencia (kg/HP)	Wc/P	15	180	210	210
Vehículos representados por el proyecto		Vehículos ligeros	Autobuses		Camión unitario

Características de los vehículos		Vehículos de proyecto tipo			
		DE-1890	DE-1980	DE-2545	DE-2970
Longitud del vehículo (m)	L	20.88	22.41	27.40	31.66
Distancia entre ejes extremos del vehículo (m)	DE	18.90	19.82	25.45	29.71
Vuelo delantero (m)	Vd	1.22	1.22	1.19	1.19
Vuelo trasero (m)	Vt	0.76	1.37	0.76	0.76
Ancho total del vehículo (m)	A	2.59	2.59	2.59	2.59
Entrevía del vehículo (m)	EV	2.44	2.44	2.44	2.44
Longitud del remolque (m)	Lr	14.63	16.15	10.06	12.19
Altura total del vehículo (m)	Ht	4.10	4.10	4.10	4.10
Altura de los ojos del conductor (m)	Hc	2.50	2.50	2.50	2.50
Altura de los faros delanteros (m)	Hf	1.12	1.12	1.12	1.12
Altura de los faros traseros (m)	Hl	1.00	1.00	1.00	1.00
Ángulo de desviación del haz de luz de los faros	α	1°	1°	1°	1°
Radio de giro mínimo (m)	Rg	13.72	13.72	13.72	15.72
Relación peso/potencia (kg/HP)	Wc/P	210	210	210	210
Vehículos representados por el proyecto		Combinación de tractor con semirremolque		Combinación de tractor con dos remolques	

Fuente: SCT, Instituto Mexicano del Transporte. *Recomendaciones de Actualización de Algunos Elementos del Proyecto Geométrico de Carreteras.* Publicación Técnica No. 244. México, 2004.

Cuando un vehículo se desplaza a lo largo de una curva horizontal, actúa sobre él la *fuerza centrífuga* que tiende a desviarlo hacia fuera de su trayectoria normal, tiende a alterar su movimiento en línea recta. Según las leyes de la dinámica, la magnitud de esta fuerza es:

$$F = ma \tag{5.1}$$

Donde:

F = fuerza centrífuga

m = masa del vehículo

a = aceleración radial

La relación entre la masa m y la aceleración radial a es:

$$m = \frac{P}{g} \tag{5.2}$$

$$a = \frac{v^2}{R} \tag{5.3}$$

Donde:

P = peso del vehículo

g = aceleración debida a la gravedad

v = velocidad del vehículo

R = radio de la curva circular horizontal

Por lo tanto:

$$F = ma = \frac{Pv^2}{gR} \tag{5.4}$$

En esta última expresión, se puede ver que para un mismo radio R, la fuerza centrífuga F es mayor si la velocidad v es mayor. Esto hace que el *efecto centrífugo* sea más notable.

La única fuerza que se opone al deslizamiento lateral del vehículo es la *fuerza de fricción* F_t entre las ruedas y el pavimento. Esta fuerza por sí sola, generalmente a velocidades altas, no es suficiente para impedir el deslizamiento transversal. Por lo tanto, será necesario buscarle un complemento, inclinando transversalmente la calzada. Esta inclinación denominada *sobreelevación* o *peralte*, junto con la fricción y el peso propio del vehículo, eliminan el efecto centrífugo, estableciendo la estabilidad del vehículo en la curva.

En la figura 5.10 se muestra un esquema de las fuerzas externas que actúan en un vehículo que circula sobre una curva y que tienden a deslizarlo o volcarlo hacia la parte exterior de la curva, situación más común que se presenta en la práctica en la mayoría de los vehículos.

Figura 5.10 Estabilidad del vehículo en curva

La condición necesaria para que el vehículo no se deslice transversalmente, se plantea así: la resultante paralela al pavimento ($F_x - P_x$) actúa hacia la izquierda, por lo que debe ser contrarrestada por la fuerza de fricción transversal F_t, entre las ruedas y el pavimento y que actúa hacia la derecha. Esto es:

$$F_x - P_x = F_t$$

Pero también se sabe que:

$$\textit{Fuerza de fricción} = \textit{Fuerza normal} \times f_t$$

Donde f_t es el coeficiente de fricción lateral.

$$F_t = (F_y + P_y) f_t$$

Por lo tanto:

$$F_x - P_x = (F_y + P_y) f_t$$

$$f_t = \frac{F_x - P_x}{F_y + P_y} = \frac{F \cos \alpha - P \operatorname{sen} \alpha}{F \operatorname{sen} \alpha + P \cos \alpha}$$

Dividiendo entre $\cos\alpha$:

$$f_t = \frac{F - P\tan\alpha}{F\tan\alpha + P}$$

Reemplazando el valor de la fuerza centrífuga F, dado por la ecuación (5.4), y el valor de $\tan\alpha$ por la sobreelevación s, resulta:

$$f_t = \frac{\dfrac{Pv^2}{gR} - Ps}{\dfrac{Pv^2 s}{gR} + P} = \frac{\dfrac{v^2}{gR} - s}{\dfrac{v^2 s}{gR} + 1}$$

$$s + f_t = \frac{v^2}{gR}(1 - f_t s)$$

En la práctica, para valores normales de la sobreelevación, no se toma en cuenta el producto $f_t s$ debido a que es muy pequeño. Entonces:

$$s + f_t = \frac{v^2}{gR}$$

Expresando la velocidad v en km/h, el radio R en metros y sustituyendo g por 9.81 m/s^2, finalmente se tiene:

$$s + f_t = \frac{v^2}{127\,gR} \tag{5.5}$$

Otro aspecto importante a definir en curvas horizontales, es la expresión de su curvatura [5]. La curvatura de un arco circular de radio R es el valor de su inverso, esto es:

$$Curvatura = \frac{1}{R}$$

Si se asimila el número 1 del numerador como un arco de un metro de longitud, el ángulo central corresponde al *grado de curvatura unitario* G_1, cuyo valor en grados sexagesimales es:

$$G_1 = \frac{180°}{\pi R} \tag{5.6}$$

De manera general, se le ha llamado *grado de curvatura* G_a al valor del ángulo central correspondiente a un arco a de determinada longitud, escogido como arco unidad. De esta manera, según la figura 5.11, la relación entre el radio R y el grado de curvatura G_a, se establece así:

$$\frac{G_a}{a} = \frac{360°}{2\pi R}$$

Figura 5.11 Grado de curvatura de una curva circular

De donde:

$$G_a = \frac{180° a}{\pi R} \tag{5.7}$$

Para el radio en metros y un arco unidad a de 20 metros, valor bastante utilizado en nuestro medio, el valor del grado de curvatura G_{20} en grados sexagesimales es:

$$G_{20} = \frac{1{,}145.92}{R} \tag{5.8}$$

Como es necesario fijar una sobreelevación máxima $s_{máx}$, se usa el 12% en aquellos lugares donde no existen heladas ni nevadas y el porcentaje de vehículos pesados en la corriente de tránsito es mínimo; se usa el 10% en lugares en donde sin haber nieve o hielo se tiene un gran porcentaje de vehículos pesados; se usa el 8% en zonas donde las heladas o nevadas son frecuentes y, finalmente, se usa el 6% en zonas urbanas [1].

Establecida la *sobreelevación máxima* $s_{máx}$, el *radio mínimo* $R_{mín}$ de la curva queda definido para cada *velocidad de proyecto* v, a partir de la ecuación (5.5), como:

$$R_{mín} = \frac{v^2}{127(s_{máx} + f_t)} \tag{5.9}$$

A su vez, el grado máximo de curvatura $G_{20\,máx}$, para un arco de 20 metros, se establece como:

$$G_{20\,máx} = \frac{146{,}000(s_{máx} + f_t)}{v^2} \tag{5.10}$$

Reemplazando en las ecuaciones (5.9) y (5.10), los valores del coeficiente de fricción lateral f_t y la sobreelevación máxima $s_{máx}$ que se considere, se calculan los valores del radio mínimo $R_{mín}$ y el grado máximo de curvatura $G_{20\,máx}$ para cada velocidad de proyecto v. Estos valores se muestran en la tabla 5.10.

Tabla 5.10 Radios mínimos y grados máximos de curvatura

Velocidad de proyecto v (km/h)	Coeficiente de fricción lateral f_t	Valores para proyecto							
		$s_{máx} = 0.12$		$s_{máx} = 0.10$		$s_{máx} = 0.08$		$s_{máx} = 0.06$	
		$R_{mín}$ (m)	$G_{20\,máx}$ (°)	$R_{mín}$ (m)	$G_{20\,máx}$ (°)	$R_{mín}$ (m)	$G_{20\,máx}$ (°)	$R_{mín}$ (m)	$G_{20\,máx}$ (°)
30	0.28	17.72	64.89	18.65	61.64	19.69	58.40	20.84	55.16
40	0.23	36.00	31.94	38.18	30.11	40.64	28.29	43.44	26.46
50	0.19	63.50	18.10	67.88	19.94	72.91	15.77	78.74	14.60
60	0.17	97.75	11.76	104.99	10.95	113.39	10.14	123.25	9.33
70	0.15	142.90	8.04	154.33	7.45	167.75	6.85	183.73	6.26
80	0.14	193.82	5.93	209.97	5.48	229.06	5.02	251.97	4.56
90	0.13	255.12	4.51	277.30	4.15	303.71	3.79	335.68	3.43
100	0.12	328.08	3.50	357.91	3.21	393.70	2.92	437.45	2.63
110	0.11	414.24	2.78	453.69	2.53	501.45	2.29	560.44	2.05
120	0.09	539.93	2.13	596.77	1.93	666.98	1.72	755.91	1.52

Fuente:
SCT. *Manual de Proyecto Geométrico de Carreteras*. México, 1991.
AASHTO. *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets*. 2004.

Para asignar sobreelevaciones s a curvas con radios R mayores que el radio mínimo $R_{mín}$, se pueden utilizar dos procedimientos:

El primero, y que es utilizado por la SCT [1], consiste en realizar una repartición lineal e inversamente proporcional, así:

$$s = \left(\frac{R_{mín}}{R}\right) s_{máx} \tag{5.11}$$

$$s = \left(\frac{G_a}{G_{a\,máx}}\right) s_{máx} \tag{5.12}$$

El segundo, y que es recomendado por la AASHTO [2], consiste en calcular la sobreelevación a través de una relación parabólica, dada por la siguiente expresión:

$$s = s_{máx} - s_{máx}\left(\frac{G_{a\,máx} - G_a}{G_{a\,máx}}\right)^2 \tag{5.13}$$

Las sobreelevaciones calculadas con el método de la SCT son menores que las calculadas con el método de la AASHTO.

Ejemplo 5.1

Mediante este ejemplo se explica el uso de la tabla 5.10. Para tal efecto, se tiene que la velocidad de proyecto del primer tramo de una carretera es de 110 km/h. Si a una determinada curva se le asigna una sobreelevación máxima de 0.10, se quiere determinar el radio mínimo para que ella garantice una operación segura. Si a esta curva se le asigna una sobreelevación máxima de 0.08, ¿cuál es el radio mínimo necesario? En un segundo tramo de esta carretera, donde la velocidad de proyecto es de 50 km/h, se quiere determinar el radio mínimo de otra curva proyectada con una sobreelevación máxima de 0.08.

Primer tramo:

Para la primera curva con velocidad de proyecto de 110 km/h y sobreelevación máxima de 0.10, según la ecuación (5.9), se tiene que el radio mínimo es:

$$R_{mín} = \frac{v^2}{127(s_{máx} + f_t)} = \frac{(110)^2}{127(0.10 + 0.11)}$$

$$= 453.69\ m$$

Con una sobreelevación máxima de 0.08, el radio mínimo es:

$$R_{mín} = \frac{(110)^2}{127(0.08 + 0.11)}$$

$$= 501.45\ m$$

Como se puede observar, para una misma velocidad de proyecto, al disminuir la sobreelevación se debe aumentar el radio de la curva para seguir conservando la estabilidad.

Segundo tramo:

Para la segunda curva con velocidad de proyecto de 50 km/h y sobreelevación máxima de 0.08, el radio mínimo es:

$$R_{mín} = \frac{(50)^2}{127(0.08 + 0.19)}$$

$$= 72.91\ m$$

Comparando esta segunda curva con la primera, se aprecia que para una misma sobreelevación al disminuir la velocidad de proyecto, también debe disminuir el radio para seguir conservando la seguridad.

Ejemplo 5.2

Para un tramo de carretera proyectado con una velocidad de 80 km/h, se ha establecido, de acuerdo a las condiciones presentes, como sobreelevación máxima el valor de 0.10. En dicho tramo y según los alineamientos horizontales, una de las curvas circulares presenta un radio de 300 metros. Para esta curva se desea conocer la sobreelevación necesaria y su grado de curvatura correspondiente.

Para resolver este problema, es necesario establecer que los radios de las curvas de este tramo de carretera son controlados por el radio mínimo para la velocidad de proyecto de 80 km/h, cuyo valor es:

$$R_{mín} = \frac{v^2}{127(s_{máx} + f_t)} = \frac{(80)^2}{127(0.10 + 0.14)}$$

$$= 209.97\ m$$

Por lo tanto, la sobreelevación para la curva de radio 300 metros utilizando el primer procedimiento, según la ecuación (5.11), es:

$$s = \left(\frac{R_{mín}}{R}\right) s_{máx} = \left(\frac{209.97}{300.00}\right) 0.10$$

$$= 0.07$$

El grado de curvatura correspondiente a un arco de un metro, de acuerdo con la ecuación (5.7), es:

$$G_1 = \frac{180^\circ a}{\pi R} = \frac{180^\circ (1\ m)}{\pi (300.00)}$$

$$= 0^\circ 11' 27.55''$$

De otra parte, la sobreelevación utilizando el segundo procedimiento, según la ecuación (5.13), es:

$$s = s_{máx} - s_{máx}\left(\frac{G_{1\,máx} - G_1}{G_{1\,máx}}\right)^2$$

Donde:

$$G_{1\,máx} = \frac{180^\circ a}{\pi R_{mín}} = \frac{180^\circ (1\ m)}{\pi (209.97)}$$

$$= 0^\circ 16' 22.35''$$

Por lo tanto:

$$s = s_{máx} - s_{máx}\left(\frac{G_{1\,máx} - G_1}{G_{1\,máx}}\right)^2 = 0.10 - 0.10\left(\frac{0°16'22.35'' - 0°11'27.55''}{0°16'22.35''}\right)^2$$

$$= 0.09$$

Obsérvese que esta sobreelevación es mayor en 2% a la calculada con el primer procedimiento.

5.6 Problemas propuestos

5.1 Se está proyectando una autopista con una velocidad de 110 km/h. Una de las curvas horizontales dispondrá de un radio de 1,500 metros. Calcular la sobreelevación necesaria para esta curva, si la sobreelevación máxima, según las especificaciones del proyecto, es de 0.12, 0.10, 0.08 y 0.06, respectivamente.

5.2 Calcular el radio de la curva circular horizontal a partir del cual la sobreelevación es igual al bombeo de 0.02, para una velocidad de proyecto de 90 km/h y una sobreelevación máxima de 0.12.

5.3 En el cálculo de una curva circular simple, definida por el sistema arco, se dispone de un arco de 20 metros para un grado de curvatura de 12°. Calcular las longitudes de las dos cuerdas iguales que reemplazan el arco de 20 metros.

Referencias bibliográficas

[1] Secretaría de Comunicaciones y Transportes. *Manual de Proyecto Geométrico de Carreteras.* Primera edición, Cuarta reimpresión, México, 1991.

[2] American Association of State Highway and Transportation Officials. *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets.* Washington, D.C., 2004.

[3] Secretaría de Comunicaciones y Transportes. *Peso y Dimensiones Máximas con los que Pueden Circular los Vehículos de Autotransporte que Transitan en los Caminos y Puentes de Jurisdicción Federal.* PROY-NOM-012-SCT-2-2003, México, 2003.

[4] Mendoza D., Alberto; Abarca P., Emilio; Mayoral G., Emilio F.; y Quintero P., Francisco L. Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte. *Recomendaciones de Actualización de Algunos Elementos del Proyecto Geométrico de Carreteras.* Publicación Técnica No. 244, Sanfandila, Querétaro, México, 2004.

[5] Cárdenas G., James. *Diseño Geométrico de Carreteras.* Primera edición, Ecoe Ediciones, Bogotá, D.C., 2002.

6

Sistema vial

6.1 Generalidaes

Uno de los patrimonios más valiosos con el que cuenta cualquier país es su infraestructura y en particular la del sistema vial, por lo que su magnitud y calidad representa uno de los indicadores del grado de desarrollo del mismo. Por esto es común encontrar un excelente sistema vial en un país de un alto nivel de vida y un sistema vial deficiente en un país subdesarrollado.

Las fotografías de las figuras 6.1, 6.2, 6.3 y 6.4 ilustran tramos típicos de las autopistas de cuota que comunican a la ciudad de México con las ciudades de Puebla, Querétaro, Toluca y Acapulco, como partes integrantes del sistema vial de la República de México.

Figura 6.1 *Autopista Ciudad de México-Puebla*

Figura 6.2 Autopista Ciudad de México-Querétaro

Figura 6.3 Autopista Ciudad de México-Toluca

Figura 6.4 *Autopista Ciudad de México-Acapulco*

A continuación se presentan aspectos generales relativos a un sistema vial, con algunos criterios y/o experiencias internacionales.

Se entiende por *camino*, aquella faja de terreno acondicionada para el tránsito de vehículos. La denominación de camino incluye a nivel *rural* las llamadas *carreteras*, y a nivel *urbano* las *calles* de la ciudad.

El diseño geométrico de las carreteras y calles, incluye todos aquellos elementos relacionados con el alineamiento horizontal, el alineamiento vertical y los diversos componentes de la sección transversal.

6.2 Clasificación de una red vial

Son diversas las clasificaciones que existen de una red vial, usualmente cada país cuenta con una particular; sin embargo, a continuación se presentan algunas de las clasificaciones más comunes.

6.2.1 Clasificación funcional

Dentro de un criterio amplio de planeación, la red vial, tanto rural como urbana, se debe clasificar de tal manera que se puedan fijar funciones específicas a las

diferentes carreteras y calles, para así atender las necesidades de *movilidad* de personas y mercancías, de una manera rápida, confortable y segura, y a las necesidades de *accesibilidad* a las distintas propiedades o usos del área colindante.

Para facilitar la movilidad es necesario disponer de carreteras y calles *rápidas*, y para tener acceso es indispensable contar con carreteras y calles *lentas*. Naturalmente entre estos dos extremos aparece todo el sistema de carreteras (rurales) y calles (urbanas).

En términos generales, las carreteras y las calles pueden clasificarse funcionalmente en tres grandes grupos: *principales* (arterias), *secundarias* (colectoras) y *locales*.

Las carreteras y calles principales son de accesos controlados destinados a proveer alta movilidad a grandes volúmenes de tránsito de paso y de poco o nulo acceso a la propiedad lateral; mientras que las carreteras y calles locales son de accesos no controlados que proveen fácil acceso a la propiedad lateral, de volúmenes de tránsito menores y raramente utilizadas por el tránsito de paso.

La figura 6.5 presenta en forma gráfica los grados de movilidad y accesibilidad de un sistema vial.

Figura 6.5 Clasificación funcional de un sistema vial

La clasificación funcional es clave en el proceso de planeación del transporte, ya que agrupa las distintas carreteras y calles en clases o sistemas de acuerdo al servicio que se espera presten. La clasificación funcional contribuye a la solución de muchos problemas mediante:

- La determinación de la importancia relativa de las distintas carreteras y calles.
- El establecimiento de las bases para la asignación de niveles de servicio o especificaciones de proyecto.
- La evaluación de deficiencias, comparando la geometría actual o los niveles de servicio con las especificaciones.
- La determinación de las necesidades resultantes.
- La estimación de los costos de las mejoras.

Con la clasificación funcional es posible:

- Establecer sistemas integrados de una manera lógica, agrupando todas las carreteras y calles que deben estar bajo una misma jurisdicción debido al tipo de servicio que ofrecen.
- Asignar responsabilidades para cada clase de camino a nivel gubernamental.
- Agrupar las carreteras y calles que requieren el mismo grado de ingeniería y competencia administrativa.
- Relacionar las especificaciones geométricas del proyecto con cada tipo de carretera o calle.
- Establecer las bases para programas a largo plazo, implementación de prioridades y planeación fiscal.

6.2.2 Sistema vial urbano

En la figura 6.6 también se ilustra, en términos de movilidad y accesibilidad, la clasificación de un sistema vial urbano, y que está de acuerdo con el esquema de jerarquía mostrado en la figura 6.7. Con el propósito de unificar y simplificar la nomenclatura, se sugiere la siguiente clasificación:

- *Autopistas y vías rápidas:* las autopistas son las que facilitan el movimiento expedito de grandes volúmenes de tránsito entre áreas, a través o alrededor de la ciudad o área urbana. Son divididas, con control total de sus accesos y sin comunicación directa con las propiedades colindantes. Una autopista tiene separación total de los flujos conflictivos, en tanto que una vía rápida puede o no tener algunas intersecciones a desnivel, pero puede ser la etapa anterior de una autopista. Estos dos tipos de arterias forman parte del sistema o red vial primaria de un área urbana.

Figura 6.6 Movilidad y accesibilidad de un sistema vial urbano

⇨ *Calles principales:* son las que permiten el movimiento del tránsito entre áreas o partes de la ciudad. Dan servicio directo a los generadores principales de tránsito y se conectan con el sistema de autopistas y vías rápidas. Con frecuencia son divididas y pueden tener control parcial de sus accesos. Las calles principales se combinan entre sí para formar un sistema que mueve el tránsito en toda la ciudad, en todas las direcciones.

- *Calles colectoras:* son las que ligan las calles principales con las calles locales, proporcionando a su vez acceso a las propiedades colindantes.

- *Calles locales*: proporcionan acceso directo a las propiedades, sean éstas residenciales, comerciales, industriales o de algún otro uso; además de facilitar el tránsito local hacia las residencias. Se conectan directamente con las calles colectoras y/o con las calles principales.

Figura 6.7 *Jerarquía de un sistema vial urbano*

6.2.3 Tipo de carreteras

En la práctica mexicana se pueden distinguir varias clasificaciones del tipo de carreteras, algunas de las cuales coinciden con la clasificación usada en otros países.

Se tienen los siguientes tipos de carreteras:

1. *Clasificación de transitabilidad*

En general corresponden a etapas de construcción y se dividen en:

- *Carretera de tierra o en terracerías:* su superficie de rodamiento es en tierra. En la mayoría de los casos solo es transitable en tiempos secos.

- *Carretera revestida:* aquellas a cuya superficie de rodamiento se le ha aplicado un tipo de revestimiento diferente a una capa de pavimento. Son transitables en todo tiempo.

- *Carretera pavimentada:* aquellas carreteras cuya superficie de rodamiento corresponde a una capa de tratamiento superficial, de asfalto o de concreto.

2. *Clasificación administrativa*

Por lo general es independiente de las características de la carretera. Llevan su nombre de acuerdo a la dependencia del gobierno que tiene a su cargo la construcción, operación y conservación; por lo que en México se clasifican en:

- *Carretera federal:* directamente a cargo de la Federación.
- *Carretera estatal*: a cargo de las Juntas Locales de Caminos.
- *Carretera vecinal*: construida con la cooperación de los particulares beneficiados. Para su conservación, pasa a la clasificación anterior.
- *Carretera de cuota*: a cargo de Caminos y Puentes Federales de Ingresos y Servicios Conexos. La inversión es recuperable a través del pago de cuotas de paso.

3. *Clasificación técnica oficial*

Permite distinguir en forma precisa la categoría física de la carretera; tomando en cuenta los volúmenes de tránsito y las especificaciones geométricas. Por lo general esta clasificación asigna categorías por número o letra. En el caso mexicano, la Secretaría de Comunicaciones y Transporte en sus Normas de Servicios Técnicos del Proyecto Geométrico de Carreteras [1], clasifica las carreteras de acuerdo a su Tránsito Promedio Diario Anual (*TPDA*) para el horizonte de proyecto, como sigue:

- *Tipo A4* : para un *TPDA* de 5,000 a 20,000 vehículos.
- *Tipo A2* : para un *TPDA* de 3,000 a 5,000 vehículos.
- *Tipo B* : para un *TPDA* de 1,500 a 3,000 vehículos.
- *Tipo C* : para un *TPDA* de 500 a 1,500 vehículos.
- *Tipo D* : para un *TPDA* de 100 a 500 vehículos.
- *Tipo E* : para un *TPDA* hasta de 100 vehículos.

Adicionalmente y para cada una de las carreteras aquí clasificadas, la misma SCT ha definido unas características mínimas de sección transversal.

6.3 Estructura de una carretera

Geométricamente, la *sección transversal* de una carretera está compuesta por el ancho de la zona o derecho de vía, el ancho de explanación, la corona, la calzada, los carriles, los acotamientos, las cunetas, las contracunetas, los taludes laterales, los ceros, la rasante, la subrasante, la subcorona, las terracerías y otros elementos complementarios. En la figura 6.8, se detallan estos elementos, para el caso de una carretera pavimentada de sección transversal mixta, corte y terraplén, ubicada en recta o tangente [2,3].

Figura 6.8 Sección transversal típica mixta, pavimentada en recta

En primer lugar se tiene la *calzada* o *superficie de rodamiento*. Es aquella faja que se ha acondicionado especialmente para el tránsito de los vehículos. En las carreteras de primera categoría esta superficie es pavimentada.

El *carril* es aquella parte de la calzada o superficie de rodamiento, de ancho suficiente para la circulación de una sola fila de vehículos.

A ambos lados de la superficie de rodamiento están los *acotamientos*, que son fajas laterales que sirven de confinamiento lateral de la superficie de rodamiento y que eventualmente se pueden utilizar como estacionamiento provisional para alojar vehículos en casos de emergencia.

La *corona* es la superficie terminada de una carretera, comprendida entre sus hombros, por lo que incluye la calzada más los acotamientos.

El *hombro* es el punto de intersección de las líneas definidas por el talud del terraplén y la corona, o por ésta y el talud interior de la cuneta.

Paralelamente a los acotamientos se tienen las *cunetas*, destinadas a facilitar el drenaje superficial longitudinal de la carretera. También pueden existir *contra cunetas*, en aquellos tramos donde se prevea la necesidad de desviar las corrientes de agua y evitar que invadan la carretera, son zanjas de sección trapezoidal, que se excavan arriba de la línea de ceros de un corte, para interceptar los escurrimientos superficiales del terreno natural.

Los *taludes* son las superficies laterales inclinadas, que en cortes queda comprendida entre la línea de ceros y el fondo de la cuneta; y en terraplenes, la que queda comprendida entre la línea de ceros y el hombro correspondiente.

El *cero* o punto extremo de talud, es el punto donde el talud de corte o terraplén encuentra el terreno natural.

La *pendiente transversal*, representada por el *bombeo* en recta o por la *sobreelevación* en curva, es la pendiente que se le da a la corona, normal a su eje.

La *subcorona* es la superficie que limita a las terracerías y sobre las que se apoyan las capas de pavimento.

Se entiende por *terracería*, el volumen de material que hay que cortar o terraplenar para formar la carretera hasta la subcorona.

Con relación al *pavimento*, se denomina así a la capa o capas de material seleccionado y/o tratado, comprendidas entre la subcorona y la corona, que tiene por objeto soportar las cargas inducidas por el tránsito y repartirlas de manera que los esfuerzos transmitidos a la capa de terracerías subyacente a la subcorona, no le causen deformaciones perjudiciales; al mismo tiempo proporciona una superficie de rodamiento adecuada al tránsito. Los primeros pavimentos conocidos fueron los de piedra, usados por los pueblos como los romanos en Europa y por los mayas en América. De este tipo de pavimentos, se han usado variaciones como los empedrados, los embaldosados y los adoquinados. Finalmente, la técnica moderna de carreteras ha incorporado el uso de tratamientos superficiales y de los concretos. En el tratamiento superficial se utiliza principalmente el asfalto y la grava. En los concretos, predomina el concreto asfáltico, aunque también es importante el concreto hidráulico. Los pavimentos de concreto, como se ha dicho, pueden ser de dos clases, el de asfalto y el de cemento. Se entiende por concreto la mezcla de un aglutinante (asfalto o cemento) y de un agregado, que en este caso es el material pétreo, de gradación controlada, esto es gravas de diferentes tamaños. El concreto hidráulico es la mezcla de cemento Pórtland, grava, arena y agua. De acuerdo con las necesidades, puede o no llevar refuerzo de varillas de acero.

La *rasante* es la línea obtenida al proyectar sobre un plano vertical el desarrollo del eje de la corona de la carretera. En la sección transversal está representada por un punto.

La *subrasante* es la proyección sobre un plano vertical del desarrollo del eje de la subcorona. En la sección transversal es un punto cuya diferencia de elevación con la rasante, está determinada por el espesor del pavimento y cuyo desnivel con respecto al terreno natural, sirve para determinar el espesor de corte o terraplén.

El ancho de *explanación*, es la distancia total horizontal comprendida entre los ceros derecho e izquierdo.

El *derecho de vía* de una carretera es la faja de terreno destinada a la construcción, conservación, reconstrucción, ampliación, protección, y en general, para el uso adecuado de esa vía y de sus servicios auxiliares. A esta zona no se le podrá dar uso privado.

6.4 Especificaciones geométricas de las carreteras

Después de innumerables estudios basados en la experiencia, se han determinado las dimensiones convenientes para la *sección transversal* de los diferentes tipos de carreteras. Estas especificaciones en nuestro medio, provienen principalmente de la AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials), que en general han sido adoptadas en Latinoamérica, tanto para proyecto geométrico, como en el aspecto estructural. Por ejemplo, la AASHTO [4] fija la sección transversal de una carretera de dos carriles, con corona ideal de 12.20 metros, tomando en cuenta que la superficie de rodamiento deberá tener 7.20 metros y cada acotamiento 2.50 metros.

En forma funcional se fijan las dimensiones recomendables para carreteras, en función de los volúmenes de tránsito que se esperan a lo largo de la vida útil de la misma y de la velocidad de proyecto. Para las otras características de la carretera, se han fijado igualmente las limitaciones recomendables de acuerdo con la experiencia y siempre en función del uso de la carretera, de la velocidad y de los tipos de vehículos que la utilizarán. Lo importante desde el punto de vista funcional y de la ingeniería de tránsito, es considerar el volumen, el tipo de vehículos y la velocidad de proyecto.

De acuerdo con la normativa vigente del proyecto geométrico de carreteras en la República Mexicana, la tabla 6.1 muestra la anchura mínima de la calzada en carreteras de dos carriles. Igualmente, la tabla 6.2 presenta los anchos de corona, de calzada, de acotamientos y de la faja separadora central de las carreteras siguiendo la clasificación técnica oficial. A su vez, en la tabla 6.3 se resumen las principales características geométricas de las carreteras según las normas de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes de México.

Tabla 6.1 Anchura mínima para carreteras de dos carriles

Velocidad de proyecto (km/h)	Vehículos por hora (proyecto)									
	10 a 50		50 a 100		100 a 200		200 a 400		Más de 400	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
48	5.40	6.00	5.40	6.00	6.00	6.00	6.00	6.60	6.60	7.20
64	5.40	6.00	5.40	6.00	6.00	6.60	6.60	6.60	6.60	7.20
80	5.40	6.00	6.00	6.00	6.00	6.60	6.60	7.20	7.20	7.20
96	6.00	6.00	6.00	6.60	6.60	6.60	6.60	7.20	7.20	7.20
112	6.00	6.00	6.00	6.60	6.60	7.20	7.20	7.20	7.20	7.20

NOTA:
A: indica un tránsito exclusivamente de automóviles o en donde el pequeño porcentaje de vehículos comerciales influye muy poco en el movimiento general.
B: carreteras principales. Se considera tránsito importante de vehículos pesados.

Tabla 6.2 Secciones transversales de carreteras

Tipo de carretera		Anchos de				
		Corona (m)	Calzada (m)	Acotamientos (m)		Faja separadora central (m)
E		4.00	4.00	-		-
D		6.00	6.00	-		-
C		7.00	6.00	0.50		-
B		9.00	7.00	1.00		-
A	A2	12.00	7.00	2.50		-
	A4	22.00 mín.	2x7.00	Ext. 3.00	Int. 0.50	1.00 mín.
	A4S	2x11.00	2x7.00	3.00	1.00	8.00 mín.

Fuente:
SCT. *Normas de Servicios Técnicos, Proyecto Geométrico Carreteras.* México, 1984.

La Publicación Técnica No. 244, titulada Recomendaciones de Actualización de Algunos Elementos del Proyecto Geométrico de Carreteras, elaborada por el Instituto Mexicano del Transporte de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes [5], analiza la normativa mexicana vigente, contenida en las Normas de Servicios Técnicos para el Proyecto Geométrico de Carreteras [1] y en el Manual de Proyecto Geométrico de Carreteras [2], con base en las condiciones actuales de la vialidad nacional y en los avances a nivel mundial. Dicha investigación, evalúa aquellos elementos geométricos que han quedado obsoletos y que necesitan ser revisados y modificados de acuerdo a las necesidades actuales del país.

6.5 Desarrollo de las carreteras en México

Puede decirse, sin lugar a dudas, que en México la construcción de carreteras para la era motorizada se inició a partir del año 1925, año en que una ley del Presidente Plutarco Elías Calles creó la Comisión Nacional de Caminos. La asignación del primer presupuesto de obras para esta nueva dependencia, marca el principio de un esfuerzo para hacer frente a uno de los factores más importantes de la infraestructura de las carreteras del país: la integración de una red de carreteras.

La tabla 6.4 muestra el total de kilómetros de carretera existentes en la República Mexicana desde el año de 1925 hasta el año 2004, clasificados de acuerdo a su transitabilidad, en términos de brechas mejoradas, terracería, carreteras revestidas y pavimentadas.

Resulta interesante revisar la estadística de avance anual, notándose que en los años veinte y treinta este avance era reducido. Se logró el primer incremento de 1,000 kilómetros por año, de 1939 a1940. Afortunadamente, a pesar del conflicto que envolvió al mundo en esa época, México pudo dedicar un mayor esfuerzo a la construcción de caminos y sostuvo a niveles aceptables el avance anual. En ningún momento de la guerra éste fue menor de 400 kilómetros anuales de caminos pavimentados. En los años 1947 y 1948 se logró superar el avance, elevándose a 1,500 kilómetros anuales. Dicho ritmo de avance posteriormente disminuyó un poco por la depresión de la posguerra, para recuperarse definitivamente en el año 1955. A partir del año 1972 se

Tabla 6.3 Características geométricas de las carreteras

Concepto		Tipo de Carretera																													
		E					D					C							B							A					
TPDA de proyecto (veh/día)		Hasta 100					100 a 500					500 a 1,500							1,500 a 3,000							Más de 3,000					
Terreno	Montañoso																														
	Lomerío																														
	Plano																														
Velocidad de proyecto (km/h)		30	40	50	60	70	30	40	50	60	70	40	50	60	70	80	90	100	50	60	70	80	90	100	110	60	70	80	90	100	110
Dist. visibilidad de parada (m)		30	40	55	75	95	30	40	55	75	95	40	55	75	95	115	135	155	55	75	95	115	135	155	175	75	95	115	135	155	175
Dist. visibilidad de rebase (m)		-	-	-	-	-	135	100	225	270	315	180	225	270	315	360	405	450	225	270	315	360	405	450	495	270	315	360	405	450	495
Grado máximo de curvatura (°)		60	30	17	11	7.5	60	30	17	11	7.5	30	17	11	7.5	5.5	4.3	3.3	17	11	7.5	5.5	4.3	3.3	2.8	11	7.5	5.5	4.3	3.3	2.8
Curvas verticales K (m/%)	Cresta	4	7	12	23	36	3	4	8	14	20	4	8	14	20	31	43	57	8	14	20	31	43	57	72	14	20	31	43	57	72
	Columpio	4	7	10	15	20	4	7	10	15	20	7	10	15	20	25	31	37	10	15	20	25	31	37	43	15	20	25	31	37	43
Longitud mínima de curvas (m)		20	30	30	40	40	20	30	30	40	40	30	30	40	40	50	50	60	30	40	40	50	50	60	60	40	40	50	50	60	60
Pendiente gobernadora (%)		9		7		-	8		6		-	6			5			-	5			4			-	4		3			-
Pendiente máxima (%)		13		10		7	12		9		6	8			7			5	7			6			4	6		5			4
Ancho de calzada (m)		4.0					6.0					6.0							7.0							A2 7.0 2 carriles		A4 2x7.0 4 carriles		A4S 2x7.0 4 carriles	
Ancho de corona (m)		4.0					6.0					7.0							9.0							12.0 un cuerpo		22.0 un cuerpo		2x11.0 cuerpos separad.	
Ancho de acotamientos (m)		-					-					0.5							1.0							2.5		3.0 Ext. 0.5 Int.		3.0 Ext. 1.0 Int.	
Ancho separador central (m)		-					-					-							-							-		≥1.0		≥8.0	
Bombeo (%)		3					3					2							2							2					
Sobreelevación máxima (%)		10					10					10							10							10					

Fuente:
SCT. *Normas de Servicios Técnicos, Proyecto Geométrico de Carreteras*. México, 1984.

incorporaron al cuidado de la Secretaría de Obras Públicas todos los caminos hechos por otras dependencias y los del plan de caminos construidos manualmente.

A partir del año 1952 se comenzaron a construir carreteras de cuatro o más carriles, utilizando el criterio de tener un sistema de comunicaciones interestatal mucho más rápido, cómodo y seguro. Ya para el año 1962 se tenían en este tipo de carreteras 221 kilómetros, y 10,140 kilómetros para el año 2002, cumpliendo así con el programa nacional de autopistas.

A partir del año 1994 se presenta un gran incremento en la construcción de carreteras, superando los 300,000 kilómetros.

El empeño de mejorar las vías de comunicación terrestre ha sido sostenido, el cual se refleja en el progreso del país, teniendo a cada uno de los Estados mejor comunicados y llegando así para el año 2004 a los 352,000 kilómetros.

Tabla 6.4 Kilómetros de carretera existentes en la República Mexicana, de acuerdo a su transitabilidad

Año	Brechas mejoradas	Terraceria	Revestidas	Pavimentadas		Total
				2 carriles	≥4 carriles	
1925-28	-	209	245	421	-	875
1929	-	353	298	289	-	940
1930	-	629	256	541	-	1,426
1931	-	683	377	620	-	1,680
1932	-	702	467	645	-	1,814
1933	-	1,601	793	683	-	3,077
1934	-	1,786	1,291	1,183	-	4,260
1935	-	1,760	1,918	1,559	-	5,237
1936	-	1,891	2,406	2,007	-	6,304
1937	-	1,831	3,363	2,316	-	7,510
1938	-	2,035	3,424	3,004	-	8,463
1939	-	1,912	3,441	3,755	-	9,108
1940	-	1,643	3,505	4,781	-	9,929
1941	-	2,249	4,131	5,420	-	11,800
1942	-	2,250	5,194	6,082	-	13,526
1943	-	2,418	5,918	6,910	-	15,246
1944	-	2,336	6,375	7,683	-	16,394
1945	-	2,399	6,842	8,163	-	17,404
1946	-	2,663	7,267	8,614	-	18,544
1947	-	2,509	7,722	9,071	-	19,302
1948	-	2,630	7,064	10,562	-	20,256
1949	-	2,550	6,546	12,059	-	21,155
1950	-	2,024	6,836	13,595	-	22,455
1951	-	2,428	7,600	15,034	-	25,062
1952	-	2,630	8,524	16,117	-	27,332
1953	-	2,712	9,309	17,085	61	29,167
1954	-	3,404	9,653	17,785	61	30,903
1955	1,427	2,816	9,164	18,756	61	32,224
1956	800	3,851	10,191	19,856	61	35,259
1957	515	4,723	10,464	21,873	61	37,636
1958	489	5,406	11,295	23,071	61	40,322
1959	1,142	4,763	11,916	25,079	61	42,961
1960	2,850	3,850	11,203	26,918	61	44,892
1961	2,266	5,187	13,310	28,876	61	49,900
1962	3,875	5,108	14,840	29,496	221	53,540
1963	3,825	5,853	15,883	31,256	221	57,038
1964	4,295	6,353	16,506	32,949	237	60,440

continúa

Tabla 6.4 Kilómetros de carretera existentes en la República Mexicana, de acuerdo a su transitabilidad (Continuación)

Año	Brechas mejoradas	Terracería	Revestidas	Pavimentadas		Total
				2 carriles	4 carriles	
1965	1,755	6,693	18,373	34,195	236	61,252
1966	1,769	6,642	19,083	35,865	257	63,616
1967	1,43	6,563	19,534	36,804	551	65,095
1968	1,802	6,618	19,779	38,279	582	67,057
1969	1,651	6,840	20,904	39,790	596	69,781
1970	1,520	6,579	21,462	41,358	601	71,520
1971	1,300	6,206	22,654	43,272	620	74,052
1972	31,835	13,387	31,620	46,875	674	124,391
1973	32,253	17,363	56,262	50,111	717	156,706
1974	31,461	21,458	66,263	55,496	738	175,389
1975	31,530	22,486	72,715	58,637	850	186,218
1976	31,528	22,507	79,550	58,797	908	193,290
1977	31,107	24,509	81,976	60,569	899	199,060
1978	36,351	25,750	81,384	63,231	945	207,661
1979	35,908	24,103	85,447	64,810	978	211,246
1980	33,409	24,735	87,562	65,920	1,000	212,626
1981	31,497	24,601	88,728	67,336	1,076	213,238
1982	30,250	20,725	92,493	69,111	1,123	213,702
1983	29,430	18,581	97,706	69,499	1,255	216,471
1984	29,430	16,086	103,856	70,123	1,508	221,003
1985	31,398	3,516	115,384	71,475	2,452	224,225
1986	32,480	4,349	117,174	74,316	2,632	230,991
1987	32,846	4,139	117,071	75,913	3,370	236,339
1988	33,120	3,781	116,783	76,865	4,484	235,033
1989	33,120	3,781	118,195	77,196	4,765	237,057
1990	33,120	3,718	118,472	78,403	5,522	239,235
1991	33,120	3,718	118,402	79,100	6,532	240,872
1992	33,120	3,155	119,541	80,432	7,486	243,734
1993	33,120	3,026	120,666	80,389	7,982	245,183
1994	50,536	13,305	144,893	85,614	9,066	303,414
1995	50,602	13,596	147,244	87,531	9,010	307,983
1996	50,432	14,429	148,275	89,103	9,562	312,301
1997	51,780	15,188	160,649	87,484	8,876	323,977
1998	52,534	25,785	131,355	100,491	8,787	318,952
1999	52,992	22,547	145,907	98,031	10,055	329,532
2000	60,557	19,588	145,279	98,241	10,247	333.912
2001	64,736	17,337	147,474	100,562	10,348	340,457
2002	68,764	6,693	148,586	102,985	10,140	337,168
2003	66,920	13,661	151,433	106,445	10,578	349,037
2004	55,984	22,663	152,089	110,367	10,969	352,072

Fuente:
SCT. Secretaría de Comunicaciones y Transportes.
Instituto Mexicano del Transporte. *Manual Estadístico del Sector Transporte*. 2005.

Para complementar la información anterior, en la tabla 6.5 se muestra el total de kilómetros de carreteras por entidades federativas en la República Mexicana para el año 2004. Se observa en ella que a esta fecha, las entidades con mayor número de brechas mejoradas fueron Jalisco y Sonora.

En las carreteras en terracería se observa que varios Estados no registran carreteras de este tipo, mientras que los estados de Veracruz y Guerrero reportan los mayores kilometrajes de carreteras de este tipo.

Las entidades que más carreteras revestidas tuvieron, fueron Chiapas, Oaxaca, Veracruz y Tamaulipas.

En las carreteras pavimentadas de dos carriles, van a la vanguardia las entidades de Sonora, México, Michoacán y Veracruz.

Las carreteras pavimentadas de cuatro o más carriles con mayor construcción se encuentran en Chihuahua, México, Sonora, Nuevo León y Sinaloa. A su vez las que construyeron menos fueron Baja California Sur y Campeche.

En términos generales los estados de Jalisco, Sonora, Veracruz, Oaxaca y Chiapas tienen el mayor número de kilómetros en carreteras construidas de todo tipo. Se resalta que en los últimos años, los estados de Jalisco, Chihuahua y Sonora construyeron más kilómetros pavimentados para poder comunicarse con mayor rapidez y seguridad con los demás estados.

Tabla 6.5 Kilometraje de carreteras por entidades federativas en la República Mexicana al año 2004

Entidad Federativa	Brechas mejoradas	Terracería	Revestidas	Pavimentadas		Total
				2 carriles	≥4 carriles	
Aguascalientes	315	-	811	1,092	130	2,348
Baja California	4,283	375	4,180	2,090	323	11,251
Baja California Sur	1,056	738	1,760	1,643	49	5,246
Campeche	608	704	287	3,578	57	5,234
Coahuila	-	-	4,439	3,285	580	8,304
Colima	141	-	1,055	757	171	2,124
Chiapas	-	1,055	16,015	4,522	272	21,864
Chihuahua	-	1,063	6,417	4,686	882	13,048
Distrito Federal	-	-	-	79	70	149
Durango	2,153	-	7,603	3,949	394	14,099
Guanajuato	2,072	-	4,882	4,293	516	11,763
Guerrero	-	5,822	7,079	3,589	262	16,752
Hidalgo	1,274	180	6,260	3,138	307	11,159
Jalisco	14,156	185	5,062	4,919	646	24,968
México	-	-	7,815	5,588	785	14,188
Michoacán	4,000	-	3,317	5,582	429	13,328
Morelos	-	-	459	1,325	244	2,028
Nayarit	1,881	-	2,134	1,492	143	5,650
Nuevo León	-	-	2,904	3,558	739	7,201
Oaxaca	-	2,435	12,948	4,589	85	20,057
Puebla	154	-	4,394	4,486	225	9,259
Querétaro	-	-	1,873	1,310	143	3,326
Quintana Roo	-	-	2,859	2,364	214	5,437
San Luís Potosí	-	110	6,738	4,359	320	11,527
Sinaloa	5,401	1,836	5,461	3,192	717	16,607
Sonora	13,476	-	-	9,601	753	23,830
Tabasco	-	550	4,037	3,929	139	8,655
Tamaulipas	-	446	9,034	3,998	324	13,802
Tlaxcala	-	-	1,228	1,251	76	2,555
Veracruz	-	7,164	9,570	5,320	533	22,587
Yucatán	3,669	-	5,432	2,960	274	12,335
Zacatecas	1,345	-	6,036	3,843	176	11,391
Total	55,984	22,663	152,089	110,367	10,969	352,072

Fuente:
SCT. *Anuario Estadístico*. 2005.

Referencias bibliográficas

[1] Secretaría de Comunicaciones y Transportes. *Normas de Servicios Técnicos, Proyecto Geométrico de Carreteras.* México, 1984.

[2] Secretaría de Comunicaciones y Transportes. *Manual de Proyecto Geométrico de Carreteras.* Primera edición, Cuarta reimpresión, México, 1991.

[3] Cárdenas G., James. *Diseño Geométrico de Carreteras*. Primera edición, Ecoe Ediciones, Bogotá, D.C., 2002.

[4] American Association of State Highway and Transportation Officials. *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets.* Washington, D.C., 2004.

[5] Mendoza D., Alberto; Abarca P., Emilio; Mayoral G., Emilio F.; y Quintero P., Francisco L. Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte. *Recomendaciones de Actualización de Algunos Elementos del Proyecto Geométrico de Carreteras.* Publicación Técnica No. 244, Sanfandila, Querétaro, México, 2004.

7

Dispositivos para el control del tránsito

7.1 Antecedentes

La infraestructura vial es el medio que posibilita el transporte mediante el uso de automóviles, autobuses, camiones, motocicletas y bicicletas, así como el transporte a pie; esta infraestructura rural o urbana, se constituye básicamente por carreteras, calles y banquetas. Para que éstas operen eficientemente deben proporcionar a los usuarios seguridad, confort y fluidez, para ello es indispensable que el conductor, peatón o pasajero, disponga de la información suficiente y oportuna para usar adecuadamente las vialidades, lo cual se logra en gran medida a través de las señales de tránsito, lo que ha permitido obtener el máximo rendimiento de cualquier vialidad.

Debido a la creciente demanda del auto transporte, se han venido desarrollando redes de calles y carreteras de forma acelerada y para que éstas operen con eficiencia, se ha hecho necesario desarrollar sistemas de señalización estandarizado, en donde la uniformidad juega un papel importante, ya que esta característica es la que permite que los usuarios interpreten de igual forma la información que se les transmite a través de señales a lo largo de las rutas, ya sean rurales o urbanas, dado que éstas no son más que la propagación entre unas y otras.

De allí que, las entidades del gobierno que manejan las obras públicas, las comunicaciones y el transporte de nuestros países, conscientes por los altos índices de accidentalidad que se presentan en sus redes viales y por la creciente necesidad de ofrecer mayor seguridad e información al usuario de las calles y carreteras, producto del incremento del parque vehicular, así como del crecimiento y modernización de su infraestructura vial, y con el objeto de unificar a nivel regional, nacional e interamericano el criterio de utilización de los diferentes *dispositivos de control del tránsito*, han encargado a los responsables de obras públicas, comunicaciones y transportes la revisión y actualización de los manuales de dispositivos vigentes que controlan el tránsito por calles y carreteras [1,2,3].

En el Continente Americano, la necesidad de establecer la uniformidad en la señalización, se ha venido discutiendo desde el Segundo Congreso Panamericano de Carreteras, en Río de Janeiro, Brasil en 1929. Desde entonces se ha recomendado la adopción de medidas tendientes a la implementación de un sistema uniforme de

señalamiento vial. Así mismo, aún y cuando el tránsito vehicular entre América, Europa, Asia, África y Oceanía no se ha dado, se estima conveniente unificar la señalización en un sistema mundial mediante la uniformidad en el uso de la forma, tamaño, ubicación y color. De igual manera así como evitar el uso de los mensajes escritos, ya que éstos establecen una barrera en su entendimiento, básicamente por los distintos idiomas y niveles culturales que existen entre los diversos países, siendo mejor utilizar símbolos, ya que éstos expresan el mensaje que se le quiere transmitir al usuario, por ejemplo en lugar de una señal preventiva diciendo "Escuela", para indicar la proximidad de un centro escolar, se presenta la silueta de unos niños caminando.

Este anhelo de contar con un sistema de señalización mundial, dista mucho de su logro, ya que en la actualidad todavía existen países donde el señalamiento es diferente entre sus distintos estados y municipios y que decir entre los países de un mismo continente, situación que en buena parte ha limitado su desarrollo comercial y turístico, pese a los esfuerzos que se han venido haciendo por las Organizaciones Internacionales como son: La Conferencia de Transporte Vial de las Naciones Unidas, celebrada en Ginebra Suiza en 1949 y el Proyecto de Convención para un Sistema Uniforme de Señales, que preparó en 1952 la ONU, o los esfuerzos del Congreso Panamericano de Carreteras (COPACA) por lograr la elaboración de un Manual Interamericano que permita disponer de un conjunto de normas y especificaciones que indiquen a los usuarios de las vías públicas, la forma correcta y segura de transitar por ellas, a fin de evitar accidentes y demoras innecesarias, manual que se concluyó en 1968 y se presentó como proyecto en 1971 en el XI COPACA en Quito, Ecuador, junto con el proyecto de convenio para su adopción, documentos que fueron aprobados por parte de los Estados Americanos participantes, y es así que en diciembre de 1979 durante el XIII COPACA en Venezuela, se inicia la firma del convenio por parte de los representantes titulares de los países.

En México a partir de 1957 se fue adoptando el sistema de señalamiento que se aplicaba en los Estados Unidos de Norteamérica, introduciendo algunas modificaciones lo que motivó el uso de una extensa variedad de señales, situación por lo que considerando la recomendación de la ONU en 1952, dada en el proyecto de Convención para un Sistema Uniforme de Señales, y toda vez que reúne elementos del sistema de los Estados Unidos, así como el uso de símbolos que hace particularmente valioso el Protocolo de Ginebra, se tomó la decisión de producir un manual mexicano para el control del tránsito en calles y caminos, el cual debería satisfacer dos objetivos fundamentales, el primero de adherirse al movimiento internacional para promover y facilitar el tránsito entre los países del continente, a través de una señalización de fácil comprensión independientemente del idioma del usuario, y el segundo lograr la uniformidad y con ésta la efectividad del señalamiento en toda la República Mexicana. Bajo estos conceptos la Secretaría de Obras Públicas junto con otras dependencias gubernamentales y asociaciones civiles, elaboraron en 1965 el Manual de Dispositivos para el Control del Tránsito en Calles y Carreteras, aprovechando parte del material que ya se utilizaba en otros países, así como introduciendo nuevos conceptos y símbolos no considerados por la ONU, pero que respondían a las necesidades del sistema vial del país.

De 1965 a 1989 el Manual se actualiza y en la última edición se aportan diversos elementos que fueron útiles en la elaboración del Manual Interamericano; posteriormente aprovechando la actualización de las normas técnicas de la Secretaría de Comunicaciones y Transporte, en 1999 se introducen nuevos conceptos en lo correspondiente a las marcas en el pavimento, los que se publican dentro de la Normativa para la Infraestructura del Transporte [4].

Por otra parte, y teniendo en cuenta que México es un país pleno, con toda clase de manifestaciones artísticas, históricas, culturales, paisajísticas, artesanales y de monumentos, en 1978 la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, la Secretaría de Turismo y la entonces Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas, establecieron las bases para el desarrollo de un sistema de señalamiento turístico y de servicios, que permitiera identificar y ubicar los sitios de interés, así como las instalaciones y servicios turísticos disponibles. Fue así como en 1982 se editó provisionalmente el Sistema Nacional de Señalamiento Turístico, que vino a constituirse en el antecedente de la primera edición del *Manual de Señalamiento Turístico y de Servicios*, editado en 1992 por la Dirección General de Proyectos, Servicios Técnicos y Concesiones de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes [5]. Así mismo, el Programa de Ciudades Coloniales, para presentar las señales informativas turísticas y de servicios, propone un formato que, respetando la forma cuadrada de la señal y el diseño básico de cada símbolo, incorpora un concepto del carácter cultural del país al darle a sus bordes o marco un tratamiento de papel cortado, antigua artesanía que tuvo sus orígenes en los usos ceremoniales del papel amate en Mesoamérica.

No obstante de disponer de Manuales y de la Normativa referidos, se siguió observando el uso de criterios y señales distintas, no lográndose la uniformidad en la señalización, por lo que se decidió expedir al amparo de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, la Norma Oficial Mexicana NOM-034-ST2-2003, sobre *Señalamiento Horizontal y Vertical de Carreteras y Vialidades Urbanas* [3], cuyo objetivo es establecer los requisitos generales que han de considerarse para diseñar e implementar el señalamiento vial de las carreteras y vialidades urbanas de jurisdicción federal, estatal y municipal; siendo esta Norma Oficial Mexicana de aplicación obligatoria, misma que establece los requisitos para la señalización invocando a la Normativa para la Infraestructura del Transporte, al Manual de Dispositivos para el Control de Tránsito en Calles y Carreteras y al Manual de Señalamiento Turístico y de Servicios, en todo lo que no se oponga a ésta, e incluye las modificaciones pertinentes y otros elementos que coadyuvaron a su actualización científica y tecnológica.

En Colombia, en el año 2004, el Ministerio de Transporte elaboró el *Manual de Señalización Vial: Dispositivos para la Regulación del Tránsito en Calles, Carreteras y Ciclorrutas* [2].

7.2 Clasificación de los dispositivos de control

Se denominan *dispositivos para el control del tránsito* a las señales, marcas, semáforos y cualquier otro dispositivo, que se colocan sobre o adyacente a las calles y

carreteras por una autoridad pública, para prevenir, regular y guiar a los usuarios de las mismas. Los dispositivos de control indican a los usuarios las precauciones (prevenciones) que deben tener en cuenta, las limitaciones (restricciones) que gobiernan el tramo en circulación y las informaciones (guías) estrictamente necesarias, dadas las condiciones específicas de la calle o carretera.

Los dispositivos para el control del tránsito en calles y carreteras se *clasifican* en [1,3]:

1. ***Señales Verticales***

- ⇨ Preventivas.
- ⇨ Restrictivas.
- ⇨ Informativas.
- ⇨ Turísticas y de servicios.
- ⇨ Señales diversas.

2. ***Señales Horizontales***

- ⇨ Rayas.
- ⇨ Marcas.
- ⇨ Botones.

3. ***Dispositivos para protección en obras***

- ⇨ Señales horizontales:
  Rayas.
  Símbolos.
  Marcas.
  Vialetas.
  Botones.
- ⇨ Señales verticales:
  Preventivas.
  Restrictivas.
  Informativas.
  Diversas.
- ⇨ Barreras levadizas.
- ⇨ Barreras fijas.
- ⇨ Conos.
- ⇨ Tambos.
- ⇨ Dispositivos luminosos.
- ⇨ Señales manuales.

4. Semáforos

- Vehiculares.
- Peatonales.
- Especiales.

7.3 Requisitos

Cualquier dispositivo para el control del tránsito debe cubrir los siguientes *requisitos fundamentales* [1,6]:

- Satisfacer una necesidad.
- Llamar la atención.
- Transmitir un mensaje simple y claro.
- Imponer respeto a los usuarios de las calles y carreteras.
- Estar en el lugar apropiado con el fin de dar tiempo para reaccionar.

El ingeniero de tránsito usualmente es el encargado de determinar la necesidad de los dispositivos de control. Existen cuatro *consideraciones básicas* [7] para asegurarse que los dispositivos de control sean efectivos, entendibles y satisfagan los requisitos fundamentales anteriores. Estos factores son:

- *Diseño*: la combinación de las características tales como forma, tamaño, color, contraste, composición, iluminación o efecto reflejante, deberán llamar la atención del usuario y transmitir un mensaje simple y claro.

- *Ubicación*: el dispositivo de control deberá estar ubicado dentro del cono visual del conductor, para llamar la atención, facilitar su lectura e interpretación, de acuerdo con la velocidad de su vehículo y dar el tiempo adecuado para una respuesta apropiada.

- *Uniformidad*: los mismos dispositivos de control o similares deberán aplicarse de manera consistente, con el fin de encontrar igual interpretación de los problemas de tránsito a lo largo de una ruta.

- *Conservación*: los dispositivos deberán mantenerse física y funcionalmente conservados, esto es, limpios y legibles, lo mismo que deberán colocarse o quitarse tan pronto como se vea la necesidad de ello.

Por lo tanto, al proyectar dispositivos de control del tránsito, lo más importante es lograr la uniformidad de formas, tamaños, símbolos, colores, ubicación, etc., de manera que satisfagan una necesidad, llamen la atención, impongan respeto y transmitan un mensaje claro y legible, tal como lo ilustra las fotografías de la figura 7.1.

Figura 7.1 Efectividad de un dispositivo de control del tránsito

7.4 Señales preventivas

Las *señales preventivas*, identificadas con la clave *SP*, son tableros con símbolos y leyendas, que tienen como *función* dar al usuario un aviso anticipado para prevenirlo de la existencia, sobre o a un lado de la calle o carretera, de un peligro potencial y su naturaleza. Así se cumple con la Regla de Oro del Tránsito que dice: *"que no deben existir cambios bruscos"*. La señal por sí misma debe provocar que el conductor adopte medidas de precaución, y llamar su atención hacia una reducción de su velocidad o a efectuar una maniobra con el interés de su propia seguridad o la de otro vehículo o peatón.

Las señales preventivas deberán instalarse siempre que una investigación o estudio de tránsito indique que existe una condición de peligro potencial. Las características que pueden justificar el uso de señales preventivas, son las siguientes:

- Cambios en el alineamiento horizontal y vertical por la presencia de curvas.
- Presencia de intersecciones con carreteras o calles, y pasos a nivel con vías de ferrocarril.
- Reducción o aumento del número de carriles y cambios de anchura del pavimento.
- Pendientes peligrosas.
- Proximidad de un crucero donde existe un semáforo o donde se debe hacer un alto.
- Pasos peatonales y cruces escolares.
- Condiciones deficientes en la superficie de la carretera o calle, como presencia de huecos y protuberancias.
- Presencia de derrumbes, grava suelta, etc.
- Aviso anticipado de dispositivos de control por obras de construcción.

El tablero de las señales preventivas será de forma *cuadrada*, de esquinas redondeadas, que se colocará con una de sus diagonales en sentido vertical tomando la forma de *diamante*. Las señales que requieran una explicación complementaria, además del símbolo, llevarán un tablero adicional en su parte inferior de forma *rectangular* con su mayor dimensión en posición horizontal y con las esquinas redondeadas, con leyendas, entre otras, como 3.20 m, o la distancia a la que se presenta la situación que se señala, formando así un conjunto.

Los colores de las señales preventivas serán en acabado reflejante: *amarillo* para el fondo, y *negro* para el símbolo, leyendas, caracteres y filete, a excepción del símbolo de "ALTO" en la señal de "ALTO PRÓXIMO" que debe ser *rojo* y el símbolo de la señal "TERMINA PAVIMENTO" que debe ser *negro con blanco.*

El tablero adicional debe tener fondo de color *amarillo* reflejante, con letras y filetes de color *negro.*

El color del reverso del tablero y de la estructura de soporte, debe ser *gris mate* o acabado *galvanizado*.

La figura 7.2 ilustra los diferentes tipos de señales preventivas y la tabla 7.1 el significado de cada una de ellas.

La ubicación de las señales preventivas en sentido *longitudinal* será antes del riesgo que se trate de señalar, a una distancia que depende de la velocidad de aproximación, la cual puede variar a juicio del proyectista en situaciones especiales para lograr las mejores condiciones de visibilidad. En sentido *lateral* las señales se fijarán en uno o dos postes colocados a un lado del acotamiento en carreteras o sobre la banqueta en calles, a las distancias laterales y alturas que se especifican en la figura 7.3.

La fotografía de la figura 7.4 ilustra el uso de las señales preventivas en la práctica. El catálogo completo de las señales preventivas, las condiciones bajo las cuales

se deben emplear, así como las dimensiones de los símbolos y leyendas, se presentan en el Manual de Dispositivos para el Control del Tránsito en Calles y Carreteras [1], complementado con la norma N-PRY-CAR-10-01-003/99 [8].

7.5 Señales restrictivas

Las *señales restrictivas*, identificadas con la clave SR, son tableros con símbolos y/o leyendas, que tienen como *función* expresar en la calle o carretera alguna fase del Reglamento del Tránsito, para su cumplimiento por parte del usuario. En general, tienden a restringir algún movimiento del mismo, recordándole la existencia de alguna prohibición o limitación reglamentada. Infringir las indicaciones de una señal restrictiva acarreará las sanciones previstas por las autoridades de tránsito.

Las señales restrictivas de acuerdo a su uso se clasifican en los siguientes grupos:

- De derecho de paso o de vía.
- De inspección.
- De velocidad.
- De circulación o de dirección.
- De mandato por restricciones y prohibiciones.
- De estacionamiento.

El tablero de las señales restrictivas será de forma *cuadrada*, con dos de sus lados en posición horizontal y las esquinas redondeadas, excepto la señal de "ALTO", que tendrá forma *octagonal* con dos de sus lados en posición horizontal; la señal de "CEDA EL PASO", que tendrá forma *triangular* con los tres lados iguales, con uno de sus vértices hacia abajo y con las esquinas redondeadas; y la señal de "SENTIDO DE CIRCULACIÓN", que tendrá forma *rectangular*, con su mayor dimensión horizontal y con las esquinas redondeadas. En virtud de que esta última señal establece el sentido en que deben circular los vehículos, tiene carácter de restrictiva.

Las señales restrictivas que requieran una explicación complementaria, además del símbolo llevarán un tablero adicional de forma *rectangular*, con su mayor dimensión en posición horizontal y con las esquinas redondeadas, colocado en su parte inferior formando un conjunto. El tablero adicional podrá tener, entre otras, las leyendas "ADUANA" o "SALIDA".

El color del fondo de las señales restrictivas será *blanco* en acabado reflejante. El anillo y la franja diagonal en *rojo*, y el símbolo, letras y filete en *negro*, excepto las señales de "ALTO", "CEDA EL PASO" y "SENTIDO DE CIRCULACIÓN". La señal de "ALTO" llevará fondo *rojo* con letras y filete en *blanco*. La señal de "CEDA EL PASO" llevará fondo blanco, con letras en negro y el contorno en rojo. La señal de "SENTIDO DE CIRCULACIÓN" llevará fondo de color *negro* y la flecha de color *blanco* reflejante.

El tablero adicional debe tener fondo de color *blanco* reflejante, con letras y filetes de color *negro*.

Figura 7.2 *Tipos de señales preventivas*

(Fuente: SCT. *Manual de Dispositivos para el Control del Tránsito en Calles y Carreteras.* México)

Tabla 7.1 Significado de las señales preventivas

Código de la señal	Significado de la señal
SP-6	Curva
SP-7	Curva cerrada
SP-8	Curva inversa
SP-9	Curva cerrada inversa
SP-10	Camino sinuoso
SP-11	Cruce de caminos
SP-12	Entronque en T
SP-13	Entronque en delta
SP-14	Entronque lateral oblicuo
SP-15	Entronque en Y
SP-16	Glorieta
SP-17	Incorporación de tránsito
SP-18	Doble circulación
SP-19	Salida
SP-20	Estrechamiento simétrico
SP-21	Estrechamiento asimétrico
SP-22	Puente móvil
SP-23	Puente angosto
SP-24	Anchura libre
SP-25	Altura libre
SP-26	Vado
SP-27	Termina pavimento
SP-28	Superficie derrapante
SP-29	Pendiente peligrosa
SP-30	Zona de derrumbes
SP-31	Alto próximo
SP-32	Peatones
SP-33	Cruce de escolares
SP-34	Ganado
SP-35	Cruce de ferrocarril
SP-36	Maquinaria agrícola
SP-37	Semáforo
SP-38	Camino dividido
SP-39	Ciclistas
SP-40	Grava suelta

Fuente: SCT. *Manual de Dispositivos para el Control del Tránsito en Calles y Carreteras*. México

Figura 7.3 *Distancia lateral y altura de las señales preventivas*
(Fuente: SCT. *Manual de Dispositivos para el Control del Tránsito en Calles y Carreteras.* México)

Figura 7.4 *Señales preventivas*

El color del reverso del tablero y de la estructura de soporte, debe ser *gris mate* o acabado *galvanizado*.

La figura 7.5 ilustra los diferentes tipos de señales restrictivas y la tabla 7.2 el significado de cada una de ellas.

La ubicación *longitudinal* de las señales restrictivas será en el punto mismo donde existe la restricción o prohibición, eliminando cualquier objeto que pudiera obstruir su visibilidad. En sentido *lateral* las señales se fijarán en uno o dos postes colocados a un lado del acotamiento en carreteras y sobre la banqueta en calles, a las distancias y alturas que se especifican en la Figura 7.6.

La fotografía de la figura 7.7 ilustra el uso de las señales restrictivas en la práctica.

El catálogo completo de las señales restrictivas, las condiciones bajo las cuales se deben emplear, así como las dimensiones de los símbolos y leyendas, se presentan en el Manual de Dispositivos para el Control del Tránsito en Calles y Carreteras [1], complementado con la norma N-PRY-CAR-10-01-004/99 [9].

7.6 Señales informativas

Las *señales informativas*, identificadas con la clave *SI*, son tableros fijados en postes con leyendas, escudos y flechas, que tienen como *función* guiar al usuario a lo largo de su itinerario por calles, carreteras y autopistas, e informarle sobre nombres y ubicación de poblaciones, lugares de interés, servicios, kilometrajes y ciertas recomendaciones que conviene observar.

Las señales informativas, de acuerdo a la información que proporcionan, se clasifican en:

- De identificación (*SII*).
- De destino (*SID*).
- De recomendación (*SIR*) e información general (*SIG*).
- De servicios y turísticas (*SIST*), de servicios (*SIS*) y turísticas (*SIT*).

El catálogo completo de las señales informativas, las condiciones bajo las cuales se deben emplear, así como las dimensiones de los símbolos y leyendas, se presentan en el Manual de Dispositivos para el Control del Tránsito en Calles y Carreteras [1], complementado con la norma N-PRY-CAR-10-01-005/99 [10].

7.6.1 Señales informativas de identificación

Identificadas con la clave *SII*, tienen como *función* identificar las calles según su nombre y nomenclatura, y las carreteras según su número de ruta y/o kilometraje.

La forma de las señales de *nomenclatura* será *rectangular* con su mayor dimensión horizontal y con la leyenda en ambas caras. Las señales de *ruta* tendrán forma de *escudo*, federal, estatal o camino rural, colocado sobre un tablero *rectangular*, que incluye una flecha que indica la trayectoria que sigue la ruta, o dentro de las señales informativas de destino. El tablero de las señales de *kilometraje* será *rectangular* colocado con su mayor dimensión vertical.

El color del fondo de las señales de identificación será *blanco* reflejante, y las letras, números, flechas y filete en *negro*.

En la figura 7.8 se ilustran algunas señales informativas de identificación y su ubicación general, y en la tabla 7.3 el significado de cada una de ellas.

7.6.2 Señales informativas de destino

Identificadas con la clave *SID*, tienen como *función* informar a los usuarios sobre el nombre y la ubicación de cada uno de los destinos que se presentan a lo largo de su recorrido. Podrán ser señales *bajas*, *diagramáticas* y *elevadas*. Su aplicación es primordial en las intersecciones, donde el usuario debe elegir la ruta a seguir según el destino seleccionado. Se emplearán en forma secuencial de tal manera que permitan a los conductores preparar con la debida anticipación su maniobra en la intersección, ejecutarla en el lugar preciso, y confirmar la correcta selección del destino.

Su forma será *rectangular*, colocadas con su mayor dimensión horizontal, sobre apoyos adecuados.

El color de fondo de las señales de destino será *verde* reflejante y las letras, números, flechas, escudos y filete en color *blanco* reflejante, excepto las señales *diagramáticas* en zona urbana, que serán de fondo *blanco* con caracteres, flecha alargada y filete en color *negro*, y las señales *informativas* de *destino turístico* o de *servicios*, en las que el fondo debe ser de color *azul* reflejante, con símbolos, caracteres y filetes de color *blanco*.

De acuerdo a su ubicación *longitudinal*, las señales informativas de destino se clasifican en previas, decisivas y confirmativas. Las señales *previas* deberán colocarse anticipadas a la intersección, a una distancia tal que permita a los conductores conocer los destinos y preparar las maniobras para tomar el elegido. Las señales *decisivas* se colocarán donde el usuario deba tomar la ruta deseada. Las señales *confirmativas* se colocarán después de una intersección o a la salida de una población, a una distancia donde no exista el efecto de los movimientos direccionales ni la influencia del tránsito urbano, para confirmar al usuario que ha tomado la ruta deseada, indicándole la distancia por recorrer.

La figura 7.9 ilustra los diferentes tipos de señales informativas de destino y la tabla 7.4 el significado de cada una de ellas.

La figura 7.10 muestra la ubicación lateral y altura de las señales informativas de destino.

La fotografía de la figura 7.11 ilustra el uso de las señales informativas de destino en la práctica.

7.6.3 Señales informativas de recomendación

Identificadas con la clave *SIR*, tienen como *función* recordar a los usuarios determinadas recomendaciones o disposiciones de seguridad que conviene observar durante su recorrido por calles y carreteras. Serán de forma *rectangular*, colocadas con su mayor dimensión horizontal sobre apoyos adecuados.

Las señales informativas de recomendación que requieran información complementaria, deben tener abajo un tablero adicional de forma *rectangular*, con su mayor dimensión en posición horizontal. El tablero adicional puede tener, entre otras, las leyendas "PRINCIPIA", "TERMINA", o la longitud en que se presenta la situación que se señala.

Figura 7.5 *Tipos de señales restrictivas*

(Fuente: SCT. *Manual de Dispositivos para el Control del Tránsito en Calles y Carreteras.* México)

Tabla 7.2 Significado de las señales restrictivas

Código de la señal	Significado de la señal
SR-6	Alto
SR-7	Ceda el paso
SR-8	Inspección
SR-9	Límite máximo de velocidad
SR-10	Vuelta derecha continua
SR-11	Circulación
SR-11A	Circulación
SR-12	Sólo vuelta izquierda
SR-13	Conserve su derecha
SR-14	Doble circulación
SR-15	Altura libre restringida
SR-16	Anchura libre restringida
SR-17	Peso restringido
SR-18	Prohibido rebasar
SR-19	Parada prohibida
SR-20	No parar
SR-21	Estacionamiento permitido en un corto período
SR-22	Prohibido estacionarse
SR-23	Prohibida la vuelta a la derecha
SR-24	Prohibida la vuelta a la izquierda
SR-25	Prohibido el retorno
SR-26	Prohibido seguir de frente
SR-27	Prohibido el paso a bicicletas, vehículos pesados y motocicletas
SR-28	Prohibido el paso de vehículos de tracción animal
SR-29	Prohibido el paso de maquinaria agrícola
SR-30	Prohibido el paso a bicicletas
SR-31	Prohibido el paso de peatones
SR-32	Prohibido el paso de vehículos pesados
SR-33	Prohibido el uso de señales acústicas
SR-34	Uso del cinturón de seguridad
SIG-11	Sentido de circulación

Fuente: SCT. *Manual de Dispositivos para el Control del Tránsito en Calles y Carreteras*. México

Figura 7.6 *Distancia lateral y altura de las señales restrictivas*

(Fuente: SCT. *Manual de Dispositivos para el Control del Tránsito en Calles y Carreteras.* México)

Figura 7.7 *Señales restrictivas*

El color del fondo de las señales de recomendación será *blanco* reflejante, con letras y filete en *negro*.

Se colocarán en aquellos lugares donde sea conveniente recordar a los usuarios la observancia de la disposición o recomendación que se trate. En ningún caso deben interferir con cualquiera de los otros tipos de señales, y de preferencia se deben colocar en tramos donde no existan aquellas.

7.6.4 Señales de información general

Identificadas con la clave *SIG*, tienen como *función* proporcionar a los usuarios, información general de carácter poblacional y geográfico, así como indicar nombres de obras importantes en la carretera, límites políticos, ubicación de casetas de cobro, puntos de inspección y sentidos de circulación del tránsito.

SII

SII-6

SII-14

SII-15

Figura 7.8 Tipos de señales informativas de identificación

(Fuente: SCT. *Manual de Dispositivos para el Control del Tránsito en Calles y Carreteras.* México)

Tabla 7.3 Significado de las señales informativas de identificación

Código de la señal	Significado de la señal
SII-6	Nomenclatura de calles
SII-7	Escudo de carretera federal
SII-8	Escudo de carretera federal directa de cuota
SII-9	Escudo de carretera estatal
SII-10	Escudo de camino rural
SII-11	Flecha de frente
SII-12	Flecha horizontal
SII-13	Flecha diagonal
SII-14	Kilometraje con ruta
SII-15	Kilometraje sin ruta

Fuente: SCT. *Manual de Dispositivos para el Control del Tránsito en Calles y Carreteras*. México

Su forma será *rectangular* con su mayor dimensión horizontal colocada sobre apoyos adecuados.

El color del fondo de las señales de información general será *blanco* reflejante con letras y filete en *negro*. Las que indican sentido de circulación del tránsito tendrán fondo *negro* y flecha de color *blanco* reflejante.

En la Figura 7.12 se ilustran ejemplos de las señales informativas de recomendación e información general, y en la tabla 7.5 el significado de las señales de información general.

7.6.5 Señales informativas de servicios y turísticas

Identificadas con las claves *SIS* y *SIT* , tienen como *función* informar a los usuarios la existencia de un servicio o de un lugar de interés turístico y/o recreativo, a través de tableros con pictogramas y leyendas.

La forma del tablero será un *cuadrado*. Podrá llevar un tablero adicional *rectangular* donde se indica la dirección o la distancia del sitio.

El color del fondo tanto del tablero de las señales como del tablero adicional será *azul* reflejante con pictogramas, símbolos, letras, flechas y filetes en *blanco* reflejante.

Se colocarán en el lugar donde existe el servicio y a un kilómetro del mismo. Cuando se estime conveniente, estas señales podrán colocarse a la salida de las poblaciones para indicar la distancia a la que se encuentra el o los servicios más próximos indicados en la señal.

En la figura 7.13 se ilustran las señales informativas de servicios y turísticas, y en la tabla 7.6 el significado de cada una de ellas.

Figura 7.9 *Tipos de señales informativas de destino*

(Fuente: SCT. *Manual de Dispositivos para el Control del Tránsito en Calles y Carreteras.* México)

Tabla 7.4 Significado de las señales informativas de destino

Código de la señal	Significado de la señal
SID-8	Acceso a poblado
SID-9	Entronque
SID-10	Cruce
SID-11	Confirmativa
SID-12	Diagramática
SID-13	Bandera
SID-14	Bandera doble
SID-15	Puente

Fuente: SCT. *Manual de Dispositivos para el Control del Tránsito en Calles y Carreteras*. México

El catálogo completo de las señales informativas de servicios y turísticas, las condiciones bajo las cuales se deben emplear, así como las dimensiones de los pictogramas y leyendas, se presentan en el Manual de Dispositivos para el Control del Tránsito en Calles y Carreteras [1] y en el Manual de Señalamiento Turístico y de Servicios [5], complementados con la norma N-PRY-CAR-10-01-006/99 [11].

7.7 Señales diversas

Identificadas con la clave *OD*, son dispositivos que se colocan dentro de una calle o carretera o en sus inmediaciones para protección, encauzamiento y prevención de conductores de vehículos y peatones.

De acuerdo a su *función*, se clasifican en:

- Indicadores de obstáculos.
- Indicadores de alineamiento.
- Reglas y tubos guía para vados.
- Indicadores de curvas peligrosas.
- Señales de mensaje cambiable.

7.8 Marcas

Identificadas con la clave *M*, las *marcas* son las indicaciones en forma de *rayas*, *símbolos* y *letras* que se pintan sobre el pavimento, guarniciones y estructuras, dentro de o adyacentes a las vialidades, así como los *objetos* que se colocan sobre la superficie

Figura 7.10 *Distancia lateral y altura de las señales informativas de destino*
(Fuente: SCT. *Manual de Dispositivos para el Control del Tránsito en Calles y Carreteras.* México)

Figura 7.11 *Señales informativas de destino*

de rodamiento con el fin de regular o canalizar el tránsito e indicar la presencia de obstáculos, sin distraer la atención del conductor, como lo son los *botones*, identificados con el código *DH*.

Por su uso, las marcas pueden estar sobre el pavimento, en las guarniciones para prohibición de estacionamiento, y en obstáculos adyacentes a la superficie de rodamiento.

Las marcas sobre el *pavimento* son todas las rayas como: central sencilla continua o discontinua, adicional continua para prohibir el rebase, central doble continua, separadoras de carriles, en las orillas de calzada, canalizadoras, de parada, para cruce de peatones, con espaciamiento logarítmico, y para estacionamiento. Estas marcas también incluyen los símbolos y letras para cruces de ferrocarril y usos de carriles.

Las marcas en *obstáculos* se usan para indicar la presencia de guarniciones, parapetos, aleros, pilas y estribos, postes, cabezales, defensas, muros de contención y árboles.

Los colores de las marcas serán *blanco* o *amarillo*, y en algunos casos *negros* sin ser una norma, sirviendo solamente como guía para lograr un contraste en pavimentos de color claro.

Los *botones* se pueden utilizar en calles y carreteras. Son dispositivos que se colocan en la superficie de rodamiento o en el cuerpo de las estructuras adyacentes a la vialidad. Los *botones* se usan para complementar las marcas, mejorando la visibilidad de la geometría de la vialidad, cuando prevalecen condiciones climáticas adversas y/o durante la noche, ya que disponen de un elemento reflejante en una o en ambas caras, dispuestos de tal forma que al incidir en ellos la luz proveniente de los faros de los vehículos se refleje hacia los ojos del conductor en forma de un haz luminoso. Los *botones*, de forma circular y de color blanco, se emplean colocados en el pavimento, para transmitir al usuario, mediante vibración y sonido, una señal de alerta.

Figura 7.13 *Tipos de señales informativas de servicios y turísticas*

(Fuente: SCT. *Manual de Dispositivos para el Control del Tránsito en Calles y Carreteras.* México)

Tabla 7.6 Significado de las señales informativas de servicios y turísticas

Código de la señal	Significado de la señal
SIS-1	Aeropuerto
SIS-2	Albergue
SIS-3	Área recreativa
SIS-4	Auxilio turístico
SIS-5	Campamento
SIS-6	Chalana
SIS-7	Depósito de basura
SIS-8	Estacionamiento
SIS-9	Estacionamiento para casas rodantes
SIS-10	Estación de ferrocarril
SIS-11	Gasolinera
SIS-12	Helipuerto
SIS-13	Hotel
SIS-14	Información
SIS-15	Metro
SIS-16	Mecánico
SIS-17	Médico
SIS-18	Muelle–Embarcadero
SIS-19	Parada de autobús
SIS-20	Parada de tranvía
SIS-21	Parada de trolebús
SIS-22	Restaurante
SIS-23	Sanitarios
SIS-24	Taxi
SIS-25	Teleférico
SIS-26	Teléfono
SIS-27	Trasbordador
SIT-1	Acueducto
SIT-2	Artesanías
SIT-3	Balneario
SIT-4	Cascada
SIT-5	Gruta
SIT-6	Lago o laguna
SIT-7	Monumento colonial
SIT-8	Parque nacional
SIT-9	Playa
SIT-10	Zona arqueológica

Fuente: SCT. *Manual de Dispositivos para el Control del Tránsito en Calles y Carreteras*. México

de la vialidad, al personal y a la obra en sí durante la ejecución de los trabajos, transmitiendo un mensaje relativo a las desviaciones u obras de que se trate.

Se clasifican en señales preventivas, señales restrictivas, señales informativas y señales diversas.

Las *señales preventivas de protección en obras*, identificados con la clave *SPP*, se utilizarán para prevenir a los usuarios sobre la existencia de una situación peligrosa y la naturaleza de ésta, motivada por la construcción o conservación de una calle o carretera, así como proteger a peatones, trabajadores y equipo de posibles accidentes. Serán *rectangulares* con una diagonal vertical, de fondo color *naranja*, con símbolos, leyendas, caracteres y filete en *negro*.

Las *señales restrictivas de protección en obras*, identificados con la clave *SRP*, se emplearán para indicar a los conductores ciertas restricciones y prohibiciones que regulan la circulación en las vialidades, calles y carreteras, que se encuentren en proceso de construcción o conservación. La forma y color serán las mismas definidas anteriormente para este tipo de señales.

Las *señales informativas de protección en obras*, identificados con la clave *SIP*, tendrán por objeto guiar a los conductores en forma ordenada y segura, de acuerdo con los cambios temporales necesarios durante la construcción o conservación de calles y carreteras. Serán *rectangulares* con su mayor dimensión horizontal, de fondo color *naranja*, con leyendas, caracteres y filete en *negro*.

Las *señales diversas para protección en obras*, identificadas con la clave *ODP*, son dispositivos que se colocan para encauzamiento y prevención de los usuarios de las vialidades, durante trabajos de construcción o conservación. Así como proteger al personal y la obra en sí. Pueden ser indicadores de obstáculos (*ODP – 5*) e indicadores de alineamiento (*ODP – 6*).

7.9.3 Dispositivos de canalización

Los *dispositivos de canalización para protección en obras,* identificados con la clave *DPC*, son elementos que se usan para encauzar al tránsito de vehículos y peatones a lo largo de un tramo en construcción o conservación, tanto en calles como en carreteras, para indicar cierres, estrechamientos y cambios de dirección de la ruta con motivo de la obra. Se clasifican en barreras, conos, tambos, dispositivos luminosos y señales manuales.

Las *barreras levadizas* son tableros articulados que se utilizan para dar paso exclusivamente a determinados vehículos o personas en zonas restringidas de obra. Se pintan con franjas inclinadas alternadas en colores *naranja* y *negro*.

Las *barreras fijas* son elementos modulares huecos que pueden ser llenados con agua, arena o concreto hidráulico, fabricados de materiales flexibles, ligeros y resistentes al impacto, que se colocan para impedir el paso de vehículos o peatones en zonas restringidas de obra y proteger a los usuarios, al personal de obra, a la maquinaria o a la obra en sí. Los módulos de barreras fijas son de colores *naranja* y *blanco*.

Los *conos* son dispositivos de forma cónica con una base generalmente cuadrada, que se colocan a nivel del suelo para delimitar las zonas de trabajo y encauzar al

tránsito hacia el carril adecuado. Son de color *naranja*, pudiendo llevar o no una franja de color *blanco* en el extremo superior.

Los *tambos* son dispositivos de forma cilíndrica, que se colocan a nivel del suelo para delimitar las zonas de trabajo y encauzar el tránsito hacia el carril adecuado. Son de color *naranja* con dos franjas horizontales de color *blanco* reflejante.

Los *dispositivos luminosos*, como linternas, lámparas de destello y luces eléctricas, se utilizarán durante la noche o cuando la claridad y la visibilidad disminuyan y se haga necesario llamar la atención e indicar la existencia de obstrucciones o peligros.

Las *señales manuales de protección en obras*, identificados con la clave *DPM*, son *banderas* de tela operadas manualmente que sirven para controlar el tránsito de vehículos y peatones en las zonas de trabajo, operadas por una persona conocido como *banderero*.

La figura 7.15 ilustra algunos de los dispositivos utilizados para protección en obras, y la tabla 7.9 el significado de ellos.

El catálogo completo de los dispositivos para protección en obras, las condiciones bajo las cuales se deben emplear, así como sus dimensiones, símbolos y leyendas, se presentan en el Manual de Dispositivos para el Control del Tránsito en Calles y Carreteras [1] y en las normas N-PRY-CAR-10-03-001, 002, 003 y 004/01 [13]. La fotografía de la figura 7.16 ilustra el uso de los dispositivos para protección en obras en la práctica.

7.10 Semáforos

Los semáforos son dispositivos eléctricos que tienen como *función* ordenar y regular el tránsito de vehículos y peatones en calles y carreteras por medio de luces generalmente de color rojo, amarillo y verde, operados por una unidad de control.

Con base en el mecanismo de operación de los controles de los semáforos, éstos se clasifican en:

1. Semáforos para el control del tránsito de vehículos

- ⇨ No accionados por el tránsito.
- ⇨ Accionados por el tránsito.
- ⇨ Totalmente accionados por el tránsito.
- ⇨ Parcialmente accionados por el tránsito.

2. Semáforos para pasos peatonales

- ⇨ En zonas de alto volumen peatonal.
- ⇨ En zonas escolares.

3. *Semáforos especiales*

- ⇨ De destello.
- ⇨ Para regular el uso de carriles.
- ⇨ Para puentes levadizos.
- ⇨ Para maniobras de vehículos de emergencia.
- ⇨ Con barreras para indicar aproximación de trenes.

Figura 7.14 *Diversos tipos de rayas y marcas en el pavimento en aproximaciones a una intersección*
(Fuente: SCT. *Manual de Dispositivos para el Control del Tránsito en Calles y Carreteras.* México)

Tabla 7.7 Significado del señalamiento horizontal

Código de la marca	Significado de la marca
M-1	Raya separadora de sentidos de circulación
M-2	Raya separadora de carriles
M-3	Raya en la orilla del arroyo vial
M-4	Raya guía en zonas de transición
M-5	Rayas canalizadoras
M-6	Raya de alto
M-7	Rayas para cruce de peatones
M-8	Marcas para cruce de ferrocarril
M-9	Rayas con espaciamiento logarítmico
M-10	Marcas para estacionamiento
M-11	Rayas, Símbolos y leyendas para regular el uso de carriles
M-12	Marcas en guarniciones
M-13	Marcas en estructuras y objetos adyacentes a la superficie de rodamiento
M-14	Marcas para delimitar ciclo vías
M-15	Marcas temporales
DH-1	Botones retrorreflejantes y delimitadores sobre el pavimento
DH-2	Botones retrorreflejantes sobre estructuras
DH-3	Botones

Fuente: SCT. *Normativa para la Infraestructura del Transporte: Norma N-PRY-CAR-10-01-002/99, Capítulo 002 Diseño de Señalamiento Horizontal.* México

Tabla 7.8 Clasificación del señalamiento horizontal para protección en obras

Código de la marca	Significado de la marca
MP-1	Raya separadora de sentidos de circulación
MP-1.1	Raya continua sencilla (calzada hasta 6.5 m)
MP-1.2	Raya continua doble (calzada mayor de 6.5 m)
MP-2	Raya separadora de carriles
MP-2.1	Raya separadora de carriles, continua sencilla
MP-3	Raya en la orilla de la calzada
MP-3.1	Raya en la orilla derecha, continua
MP-3.2	Raya en la orilla izquierda
MP-9	Rayas con espaciamiento logarítmico
MP-11	Símbolos para regular el uso de carriles
MP-13	Marcas en estructuras y objetos adyacentes a la superficie de rodamiento
MP-13.1	Marcas en estructuras
MP-13.2	Marcas en otros objetos
DHP-1	Vialetas sobre el pavimento
DHP-2	Vialetas sobre estructuras
DHP-3	Botones

Fuente: SCT. *Normativa para la Infraestructura del Transporte: Norma N-PRY-CAR-10-03-001/01, Capítulo 001 Ejecución de Proyectos de Señalamiento y Dispositivos para Protección en Obras.* México

Los *colores* de las luces de los semáforos deberán ser como sigue:

1. Rojo fijo

Los conductores de los vehículos se detendrán antes de la raya de parada. Los peatones no cruzarán la calzada, a menos que algún semáforo les dé la indicación de paso.

2. Amarillo fijo

Advierte a los conductores de los vehículos, que está a punto de aparecer la luz roja y que el flujo vehicular que regula la luz verde debe detenerse. De la misma manera avisa a los peatones que no disponen del tiempo suficiente para cruzar, excepto cuando exista algún semáforo indicándoles que pueden realizar el cruce. Sirve para despejar el tránsito en una intersección y para evitar frenadas bruscas.

3. *Verde fijo*

Los conductores de los vehículos podrán seguir de frente o dar vuelta a la derecha o a la izquierda, a menos que una señal prohíba dichas vueltas. Los peatones que avancen hacia el semáforo podrán cruzar, a menos de que algún otro semáforo les indique lo contrario.

4. *Rojo intermitente*

Cuando se ilumine una lente roja con destellos intermitentes, los conductores de los vehículos harán alto obligatorio y se detendrán antes de la raya de parada. Se empleará en el acceso a una vía principal.

5. *Amarillo intermitente*

Cuando se ilumine una lente amarilla con destellos intermitentes, los conductores de los vehículos realizarán el cruce con precaución. Se empleará en la vía que tenga la preferencia.

6. *Verde intermitente*

Cuando una lente verde funcione con destellos intermitentes, advierte a los conductores el final del tiempo de luz verde.

Las *flechas direccionales* deberán apuntar hacia el sentido de la circulación permitida. La flecha *vertical* apuntando hacia arriba, indica circulación de frente. La flecha *horizontal* indica vuelta aproximadamente en ángulo recto hacia la izquierda o hacia la derecha. La flecha *oblicua*, a 45° apuntando hacia arriba, indica vueltas a calles que forman ángulos distintos al de 90°.

La *cara* de un semáforo es el conjunto de unidades ópticas (lente, reflector, lámpara y portalámpara) que están orientadas en la misma dirección. Como mínimo habrá dos caras para cada acceso y en su caso se complementarán con semáforos para peatones ubicados en los extremos de cada paso peatonal.

Por tratarse este tema de suma importancia en el control del tránsito de vehículos y peatones, en el capítulo sobre SEMÁFOROS se documenta más profundamente, considerando los semáforos tanto como dispositivos de control, lo relacionado con el cálculo de la distribución de sus tiempos y su operación aislada o coordinada.

7.11 Proyectos de señalamiento tipo

7.11.1 Un caso particular

Con el deseo de complementar lo correspondiente al señalamiento vertical y horizontal, se presenta a continuación, a manera de ejemplo [14], las diversas etapas que

SPP-1

SPP-2

SIP-7

SIP-7

SIP-7

SIP-8

SIP-8

SIP-8

SIP-9

DPC-1

DPC-1

Figura 7.15 *Algunos dispositivos para protección en obras*

(Fuente: SCT. *Manual de Dispositivos para el Control del Tránsito en Calles y Carreteras.* México)

Tabla 7.9 Significado de los dispositivos para protección en obras

Código del dispositivo	Significado del dispositivo
SPP-1	Obras en el camino
SPP-2	Material acamellonado
SIP-7	Señales previas
SIP-8	Señales decisivas
SIP-9	Señales confirmativas
DPC-1	Barreras
DPC-2	Conos
DPC-3	Indicadores de alineamiento
DPC-4	Marcas en el pavimento
DPC-5	Dispositivos luminosos
DPC-6	Indicadores de obstáculos
DPM-1	Banderas
DPM-2	Lámparas

Fuente: SCT. *Manual de Dispositivos para el Control del Tránsito en Calles y Carreteras*. México

Figura 7.16 *Dispositivos para protección en obras*

usualmente se llevan a cabo en la elaboración de un proyecto de mejoramiento de un sistema de señalamiento existente:

1. Introducción

Ubicación del proyecto dentro del marco de las acciones y los programas de transporte, tránsito y vialidad del plan de desarrollo de la municipalidad. Se plantean los antecedentes y justificaciones que respaldan el propósito de implementar el proyecto, y se describen las características generales de la zona donde se va a ejecutar.

2. Objetivos

Teniendo como referencia el propósito general, se enuncian en orden de jerarquía los objetivos principales que se persiguen con el desarrollo del proyecto, como por ejemplo para el caso: mejorar la seguridad, optimizar la operación del tránsito, racionalizar la vialidad, guiar al usuario, etc.

3. Recopilación y análisis de la información

Se elaboran los *planos base*, obtenidos por restitución, digitalización o mediante levantamientos geométricos de las vialidades en estudio, dibujados a escalas apropiadas. Estos planos contienen la orientación de la zona de estudio, la simbología que describe todos los elementos físicos existentes y un cuadro resumen para las señales verticales tanto de inventario como de proyecto.

En todas las calles de la zona de estudio se realiza un *inventario de sentidos de circulación*, que igualmente contiene la nomenclatura, el número de carriles, los anchos de banquetas, el tipo de superficie de rodamiento, los servicios, las condiciones de estacionamiento, etc.

Con el propósito de obtener información relacionada con los elementos físicos y del mobiliario urbano del área del proyecto, se efectúa un *inventario de postes y árboles* y otros elementos potenciales que puedan ser utilizados para colocar señales.

Obtenido el levantamiento geométrico de las vialidades, se realiza el *inventario de señalamiento vertical,* que físicamente identifica todas las señales encontradas, su estado, su posición, tipo y leyenda.

Por último, se obtiene la información relacionada con las *condiciones del señalamiento horizontal*, como lo son las marcas, rayas, flechas y letras pintadas en el pavimento.

El análisis de toda la información recopilada anteriormente permite realizar el *diagnóstico* del señalamiento y elaborar las conclusiones pertinentes.

4. Anteproyecto de señalamiento vertical

Se establecen los sitios de importancia a nivel regional, como lugares de recreación, vialidades existentes y sitios de atracción de viajes, que dan las bases para el establecimiento de las señales informativas.

Con el inventario del señalamiento y con los destinos y vialidades definidos y aprobados, se revisa el señalamiento existente incluyendo las señales preventivas, restrictivas e informativas.

En el anteproyecto de cada plano, se analiza la necesidad de mantener algunas señales existentes, así como eliminar otras que estén fuera de las especificaciones, ya sea por estar en mal estado, mal ubicadas, no uniformes, o de diferente color y tamaño.

Las señales de anteproyecto se dibujan con el diseño completo de textos y símbolos, y se indica el sitio de la instalación de cada señal con referencias en puntos fácilmente identificables en la planta geométrica.

Además de las especificaciones y recomendaciones que se establecen en el Manual de Dispositivos, en el anteproyecto se incluyen criterios determinados con base en la experiencia en este tipo de estudios.

5. *Anteproyecto de señalamiento horizontal*

Sobre copias heliográficas de los planos base se dibujan las marcas sobre el pavimento, tales como: rayas, separadores de carriles, líneas de alto, pasos peatonales y rayas canalizadoras en isletas y camellones. En el mismo plano se dibujan los detalles del alineamiento horizontal, dejando bien claras las dimensiones de las marcas.

6. *Aprobación y verificación del anteproyecto en campo*

Terminado el anteproyecto, éste se somete a consideración de la Dirección de Vialidad del Municipio para su aprobación, se verifica en campo y se realizan los ajustes en cuanto a ubicación de señales.

7. *Proyecto definitivo*

Aprobado y revisado el anteproyecto en campo, se procede a dibujar el proyecto definitivo sobre planos en papel poliéster. Cada señal se dibuja con el diseño completo de textos y símbolos, colocadas en el plano de acuerdo al sentido de circulación del tránsito, indicando además su ubicación con referencia en puntos de fácil identificación en la planta geométrica.

8. *Especificaciones técnicas*

Se refiere al detalle de las especificaciones generales de fabricación y colocación del proyecto de señalamiento vertical y horizontal.

9. *Catálogo de cantidades de obra*

Cuantificación según el tipo y clasificación de las señales que componen el proyecto; las nuevas, las que se reubican, así como las que se eliminan.

10. Presupuesto de obra

Con las cantidades de obra se realiza el presupuesto, con el propósito de obtener una idea del costo para fines de concurso y poder evaluar las propuestas de los diferentes contratistas. El presupuesto debe basarse en precios unitarios vigentes.

7.11.2 Ejemplos de proyectos de señalamiento

Las figuras 7.17, 7.18, 7.19 y 7.20 ilustran diferentes tipos de proyecto de señalamiento en intersecciones.

Figura 7.17 *Proyecto de señalamiento en una intersección en Y*

(Fuente: SCT. *Manual de Dispositivos para el Control del Tránsito en Calles y Carreteras.* México)

Figura 7.18 *Proyecto de señalamiento en un distribuidor tipo trébol*

(Fuente: SCT. *Manual de Dispositivos para el Control del Tránsito en Calles y Carreteras.* México)

Figura 7.19 *Proyecto de señalamiento en un distribuidor tipo trompeta*

(Fuente: SCT. *Manual de Dispositivos para el Control del Tránsito en Calles y Carreteras.* México)

Figura 7.20 *Proyecto de señalamiento en una intersección en cruz*

(Fuente: SCT. *Manual de Dispositivos para el Control del Tránsito en Calles y Carreteras.* México)

Referencias bibliográficas

[1] Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Subsecretaría de Infraestructura. *Manual de Dispositivos para el Control del Tránsito en Calles y Carreteras*. Quinta edición, Dirección General de Servicios Técnicos, México, 1986.

[2] Ministerio Transporte. *Manual de Señalización Vial: Dispositivos para la Regulación del Tránsito en Calles, Carreteras y Ciclorrutas de Colombia*. Bogotá, D.C., 2004.

[3] Secretaría de Comunicaciones y Transportes. *Norma Oficial Mexicana NOM-034-SCT2-2003, Señalamiento Horizontal y Vertical de Carreteras y Vialidades Urbanas*. México, 2005.

[4] Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Subsecretaría de Infraestructura. *Normativa para la Infraestructura del Transporte*. Dirección General de Servicios Técnicos, México, 1999-2001.

[5] Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Subsecretaría de Infraestructura. *Manual de Señalamiento Turístico y de Servicios*. Primera edición, Dirección General de Proyectos Servicios Técnicos y Concesiones, México, 1992.

[6] Institute of Transportation Engineers. *Traffic Engineering Handbook*. Fifth edition, James L. Pline Editor, Washington, D.C., 1999.

[7] U.S. Department of Transportation. *Manual on Uniform Traffic Control Devices for Streets and Highways*. Federal Highway Administration, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 2003.

[8] Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Subsecretaría de Infraestructura. *Normativa para la Infraestructura del Transporte: Norma N-PRY-CAR-10-01-003/99, Capítulo 003 Diseño de Señales Preventivas*. Dirección General de Servicios Técnicos, México, 1999.

[9] Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Subsecretaría de Infraestructura. *Normativa para la Infraestructura del Transporte: Norma N-PRY-CAR-10-01-004/99, Capítulo 004 Diseño de Señales Restrictivas*. Dirección General de Servicios Técnicos, México, 1999.

[10] Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Subsecretaría de Infraestructura. *Normativa para la Infraestructura del Transporte: Norma N-PRY-CAR-10-01-005/99, Capítulo 005 Diseño de Señales Informativas*. Dirección General de Servicios Técnicos, México, 1999.

[11] Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Subsecretaría de Infraestructura. *Normativa para la Infraestructura del Transporte: Norma N-PRY-CAR-10-01-006/99, Capítulo 006 Diseño de Señales Turísticas y de Servicios*. Dirección General de Servicios Técnicos, México, 1999.

[12] Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Subsecretaría de Infraestructura. *Normativa para la Infraestructura del Transporte: Norma N-PRY-CAR-10-01-002/99, Capítulo 002 Diseño de Señalamiento Horizontal*. Dirección General de Servicios Técnicos, México, 1999.

[13] Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Subsecretaría de Infraestructura. *Normativa para la Infraestructura del Transporte: Norma N-PRY-CAR-10-03-001/01, Capítulo 001 Ejecución de Proyectos de Señalamiento y Dispositivos para Protección en Obras; Norma N-PRY-CAR-10-03-002/01, Capítulo 002 Señalamiento Vertical para Protección en Obras; Norma N-PRY-CAR-10-03-003/01, Capítulo 003 Dispositivos de Canalización para Protección en Obras; Norma N-PRY-CAR-10-03-004/01, Capítulo 004 Presentación del Proyecto de Señalamiento para Protección en Obras.* Dirección General de Servicios Técnicos, México, 2001.

[14] Cal y Mayor y Asociados, S.C. *Proyecto de Señalamiento Horizontal y Vertical: Avenida Periférico, Ciudad de Oaxaca de Juárez, Oaxaca.* Dirección General de Tránsito Metropolitano, México, 1993.

8

Volumen de tránsito

8.1 Generalidades

Al igual que muchos sistemas dinámicos, los medios físicos y estáticos del tránsito, tales como las carreteras, las calles, las intersecciones, las terminales, etc., están sujetos a ser solicitados y cargados por *volúmenes de tránsito*, los cuales poseen características *espaciales* (ocupan un *lugar*) y *temporales* (consumen *tiempo*). Las distribuciones *espaciales* de los volúmenes de tránsito generalmente resultan del deseo de la gente de efectuar viajes entre determinados orígenes y destinos, llenando así una serie de satisfacciones y oportunidades ofrecidas por el medio ambiente circundante. Las distribuciones *temporales* de los volúmenes de tránsito son el producto de los estilos y formas de vida que hacen que las gentes sigan determinados patrones de viaje basados en el tiempo, realizando sus desplazamientos durante ciertas épocas del año, en determinados días de la semana o en horas específicas del día. Al proyectar una carretera o calle, la selección del tipo de vialidad, las intersecciones, los accesos y los servicios, dependen fundamentalmente del volumen de tránsito o demanda que circulará durante un intervalo de tiempo dado, de su variación, de su tasa de crecimiento y de su composición. Los errores que se cometan en la determinación de estos datos, ocasionará que la carretera o calle funcione durante el período de proyecto, bien con volúmenes de tránsito muy inferiores a aquellos para los que se proyectó, o mal con problemas de congestionamiento por volúmenes de tránsito altos muy superiores a los proyectados.

Los estudios sobre volúmenes de tránsito son realizados con el propósito de obtener información relacionada con el movimiento de vehículos y/o personas sobre puntos o secciones específicas dentro de un sistema vial. Dichos datos de volúmenes de tránsito son expresados con respecto al tiempo, y de su conocimiento se hace posible el desarrollo de estimativos razonables de la calidad del servicio prestado a los usuarios.

8.2 Definiciones

8.2.1 Volumen, tasa de flujo, demanda y capacidad

En ingeniería de tránsito, la medición básica más importante es el conteo o aforo, ya sea de vehículos, ciclistas, pasajeros y/o peatones. Los conteos se realizan para obtener estimaciones de [1]:

- ⇨ Volumen
- ⇨ Tasa de flujo
- ⇨ Demanda
- ⇨ Capacidad

Estos cuatro parámetros se relacionan estrechamente entre sí y se expresan en las mismas unidades o similares, sin embargo, no significan lo mismo.

El *volumen* es el número de vehículos (o personas) que pasan por un punto durante un tiempo específico.

La *tasa de flujo* es la frecuencia a la cual pasan los vehículos (o personas) durante un tiempo específico menor a una hora, expresada como una tasa horaria equivalente.

La *demanda* es el número de vehículos (o personas) que desean viajar y pasan por un punto durante un tiempo específico. Donde existe congestión, la demanda es mayor que el volumen actual, ya que algunos viajes se desvían hacia rutas alternas y otros simplemente no se realizan debido a las restricciones del sistema vial.

La *capacidad* es el número máximo de vehículos que pueden pasar por un punto durante un tiempo específico. Es una característica del sistema vial, y representa su oferta. En un punto, el volumen actual nunca puede ser mayor que su capacidad real, sin embargo, hay situaciones en las que parece que esto ocurre precisamente debido a que la capacidad es estimada o calculada mediante algún procedimiento y no observada directamente en campo.

Como puede observarse, la demanda es una medida del número de vehículos (o personas) que *esperan ser servidos*, distinto de los que *son servidos* (volumen) y de los que *pueden ser servidos* (capacidad).

Cuando la demanda es menor que la capacidad, el volumen es igual a la demanda, por lo que los conteos o aforos que se realicen, son mediciones de la demanda existente.

La figura 8.1 ilustra dos situaciones de mediciones en que el volumen no refleja la demanda [2]. En la parte a), la demanda D medida en el punto 1 corriente arriba no es igual al volumen Q medido en el punto 2, debido a que se distorsiona por las limitaciones de capacidad y presencia de intersecciones a medida que se avanza corriente abajo.

Figura 8.1 *Situaciones de conteos o aforos en que el volumen no refleja la demanda*

En la parte b), en las cercanías de los puntos de medición (puntos 1 y 3) se encuentra un "cuello de botella" de capacidad c (punto 2), de tal manera que el volumen observado Q en el punto 3 refleja la descarga corriente abajo más no la demanda D corriente arriba en el punto 1.

Sólo si se cumple que $D < c$, entonces se puede decir que $Q = D$; esto es, la estimación de D con base en Q es correcta.

Por lo anterior, se define *volumen de tránsito*, como el número de vehículos que pasan por un punto o sección transversal dados, de un carril o de una calzada, durante un período determinado, y se expresa como:

$$Q = \frac{N}{T} \tag{8.1}$$

Donde:

Q = vehículos que pasan por unidad de tiempo (vehículos/período)

N = número total de vehículos que pasan (vehículos)

T = período determinado (unidades de tiempo)

8.2.2 Volúmenes de tránsito absolutos o totales

Es el *número total* de vehículos que pasan durante un lapso de *tiempo determinado*. Dependiendo de la *duración* del lapso de tiempo, se tienen los siguientes volúmenes de tránsito absolutos o totales:

1. Tránsito anual (TA)

Es el número *total* de vehículos que pasan durante *un año*. En este caso $T = 1$ *año*.

2. Tránsito mensual (TM)

Es el número *total* de vehículos que pasan durante *un mes*. En este caso $T = 1$ *mes*.

3. Tránsito semanal (TS)

Es el número *total* de vehículos que pasan durante *una semana*.
En este caso $T = 1$ *semana*.

4. Tránsito diario (TD)

Es el número *total* de vehículos que pasan durante *un día*. En este caso $T = 1$ *día*.

5. ***Tránsito horario (TH)***

Es el número *total* de vehículos que pasan durante *una hora*. En este caso $T = 1\,hora$.

6. ***Tránsito en un período inferior a una hora (Q_i)***

Es el número total de vehículos que pasan durante un período inferior a una hora. En este caso $T < 1\,hora$ y donde i, por lo general, representa el período en minutos. Así por ejemplo, Q_{15} es el volumen de tránsito total en 15 minutos.

En todos los casos anteriores, los períodos especificados, un año, un mes, una semana, un día, una hora y menos de una hora, no necesariamente son de orden cronológico. Por lo tanto, pueden ser 365 días seguidos, 30 días seguidos, 7 días seguidos, 24 horas seguidas, 60 minutos seguidos y períodos en minutos seguidos inferiores a una hora.

8.2.3 Volúmenes de tránsito promedio diarios

Se define el volumen de *tránsito promedio diario* (TPD), como el número total de vehículos que pasan durante un período dado (en días completos) igual o menor a un año y mayor que un día, dividido por el número de días del período. De manera general se expresa como:

$$TPD = \frac{N}{1\,día < T \leq 1\,año} \tag{8.2}$$

Donde N representa el número de vehículos que pasan durante T días. De acuerdo al número de días del período, se presentan los siguientes volúmenes de tránsito promedio diario, dados en *vehículos por día*.

1. ***Tránsito promedio diario anual (TPDA)***

$$TPDA = \frac{TA}{365} \tag{8.3}$$

2. ***Tránsito promedio diario mensual (TPDM)***

$$TPDM = \frac{TM}{30} \tag{8.4}$$

3. ***Tránsito promedio diario semanal (TPDS)***

$$TPDS = \frac{TS}{7} \tag{8.5}$$

8.2.4 Volúmenes de tránsito horarios

Con base en la hora seleccionada, se definen los siguientes volúmenes de tránsito horarios, dados en *vehículos por hora*:

1. Volumen horario máximo anual (VHMA)

Es el máximo volumen horario que ocurre en un punto o sección de un carril o de una calzada durante un año determinado. En otras palabras, es la hora de mayor volumen de las 8,760 horas del año.

2. Volumen horario de máxima demanda (VHMD)

Es el máximo número de vehículos que pasan por un punto o sección de un carril o de una calzada durante 60 minutos consecutivos. Es el representativo de los períodos de máxima demanda que se pueden presentar durante un día en particular.

3. Volumen horario-décimo, vigésimo, trigésimo-anual (10VH, 20VH, 30VH)

Es el volumen horario que ocurre en un punto o sección de un carril o de una calzada durante un año determinado, que es excedido por 9, 19 y 29 volúmenes horarios, respectivamente. También se le denomina volumen horario de la 10ava, 20ava y 30ava hora de máximo volumen.

4. Volumen horario de proyecto (VHP)

Es el volumen de tránsito horario que servirá de base para determinar las características geométricas de la vialidad. Fundamentalmente se proyecta con un volumen horario pronosticado. No se trata de considerar el máximo número de vehículos por hora que se puede presentar dentro de un año, ya que exigiría inversiones demasiado cuantiosas, sino un volumen horario que se pueda presentar un número máximo de veces en el año, previa convención al respecto.

Ejemplo 8.1

La tabla 8.1 presenta los volúmenes de tránsito semanal (vehículos mixtos por semana) durante las 52 semanas de los 12 meses de un año, realizados con un contador automático en una carretera rural. Para estos datos se desea calcular los indicadores de los volúmenes de tránsito anual, tránsito mensual, tránsito semanal, tránsito promedio diario anual, tránsito promedio diario mensual y tránsito promedio diario semanal.

Tabla 8.1 Volúmenes de tránsito semanal durante un año

Mes (No. de días)	Semana Número	Tránsito Semanal (veh/semana)	Mes (No. de días)	Semana Número	Tránsito Semanal (veh/semana)
Enero (31)	1	15,424	Julio (31)	27	23,418
	2	16,728		28	25,614
	3	16,415		29	27,516
	4	14,827		30	26,618
Febrero (28)	5	10,424		31	25,091
	6	11,728	Agosto (31)	32	35,220
	7	10,439		33	32,474
	8	11,314		34	31,823
Marzo (31)	9	12,425		35	29,427
	10	11,624	Septiembre (30)	36	26,324
	11	13,719		37	24,715
	12	12,824		38	22,074
	13	12,327		39	21,981
Abril (30)	14	28,472	Octubre (31)	40	19,424
	15	34,214		41	18,716
	16	27,628		42	19,416
	17	24,482		43	18,473
Mayo (31)	18	18,431	Noviembre (30)	44	20,422
	19	19,157		45	19,744
	20	18,472		46	18,429
	21	19,454		47	17,716
	22	21,623	Diciembre (31)	48	26,428
Junio (30)	23	22,613		49	27,624
	24	22,714		50	30,784
	25	23,408		51	33,424
	26	23,718		52	29,463

Tránsito anual: TA

$$TA = \sum_{m=1}^{12} TM_m = \sum_{s=1}^{52} TS_s = \sum_{d=1}^{365} TD_d = \sum_{h=1}^{8,760} TH_h \tag{8.6}$$

Donde:

m, s, d, h = mes, semana, día y hora del año

Entonces:

$$TA = \sum_{s=1}^{52} TS_s$$

$$= TS_1 + TS_2 + TS_3 + \ldots + TS_{51} + TS_{52}$$

$$= 15,424 + 16,728 + 16,415 + \ldots + 33,424 + 29,463$$

$$= 1,126,964 \text{ vehículos/año}$$

Tránsito mensual: TM

$$TM_m = \sum_{i=1}^{d} TD_i = \sum_{j=1}^{s} TS_j \tag{8.7}$$

Donde:

TM_m = tránsito mensual del mes m del año ($m = enero, febrero, ..., diciembre$)

d = número de días del mes m ($d = 28, 30$ ó 31)

s = número de semanas del mes m ($s = 4$ ó 5)

Así para los meses de enero y febrero se tiene:

$$TM_{enero} = \sum_{i=1}^{31} TD_i = \sum_{j=1}^{4} TS_j$$
$$= 15{,}424 + 16{,}728 + 16{,}415 + 14{,}827$$
$$= 63{,}394 \text{ vehículos/mes}$$

$$TM_{febrero} = \sum_{i=1}^{28} TD_i = \sum_{j=1}^{4} TS_j$$
$$= 10{,}424 + 11{,}728 + 10{,}439 + 11{,}314$$
$$= 43{,}905 \text{ vehículos/mes}$$

Tránsito semanal: TS

$$TS_s = \sum_{k=1}^{7} TD_k \tag{8.8}$$

Donde:

TS_s = tránsito semanal de la semana s del año ($s = 1, 2, 3, ..., 52$)

k = día de la semana ($k = lunes, martes, ..., domingo$)

Para las semanas número 18 y 52, los volúmenes de tránsito semanales son:

$TS_{18} = 18{,}431$ vehículos/semana

$TS_{52} = 29{,}463$ vehículos/semana

Tránsito promedio diario anual: $TPDA$

De acuerdo con la ecuación (8.3):

$$TPDA = \frac{TA}{365} = \frac{1{,}126{,}964}{365}$$
$$= 3{,}088 \text{ vehículos/día}$$

Tránsito promedio diario mensual: TPDM

La ecuación (8.4), se puede generalizar, escribiendo:

$$TPDM_m = \frac{TM_m}{d} \tag{8.9}$$

Donde:

d = número de días del mes m

Los volúmenes de tránsito promedio diario mensual para los meses de enero y febrero son:

$$TPDM_{enero} = \frac{TM_{enero}}{31} = \frac{63{,}394}{31}$$
$$= 2{,}045 \text{ vehículos/día}$$

$$TPDM_{febrero} = \frac{TM_{febrero}}{28} = \frac{43{,}905}{28}$$
$$= 1{,}568 \text{ vehículos/día}$$

Tránsito promedio diario semanal: TPDS

De igual manera, la ecuación (8.5), se puede generalizar, escribiendo:

$$TPDS_s = \frac{TS_s}{7} \tag{8.10}$$

Donde:

s = semana s del año

Por lo tanto, para las semanas 18 y 52, se tiene:

$$TPDS_{18} = \frac{TS_{18}}{7} = \frac{18{,}431}{7}$$
$$= 2{,}633 \text{ vehículos/día}$$

$$TPDS_{52} = \frac{TS_{52}}{7} = \frac{29{,}463}{7}$$
$$= 4{,}209 \text{ vehículos/día}$$

8.3 Uso de los volúmenes de tránsito

De una manera ***general***, los datos sobre volúmenes de tránsito son ampliamente utilizados en los siguientes campos [3]:

1. *Planeación*

- ⇨ Clasificación sistemática de redes de carreteras.
- ⇨ Estimación de los cambios anuales en los volúmenes de tránsito.
- ⇨ Modelos de asignación y distribución de tránsito.
- ⇨ Desarrollo de programas de mantenimiento, mejoras y prioridades.
- ⇨ Análisis económicos.
- ⇨ Estimaciones de la calidad del aire.
- ⇨ Estimaciones del consumo de combustibles.

2. *Proyecto*

- ⇨ Aplicación a normas de proyecto geométrico.
- ⇨ Requerimientos de nuevas carreteras.
- ⇨ Análisis estructural de superficies de rodamiento.

3. *Ingeniería de tránsito*

- ⇨ Análisis de capacidad y niveles de servicio en todo tipo de vialidades.
- ⇨ Caracterización de flujos vehiculares.
- ⇨ Zonificación de velocidades.
- ⇨ Necesidad de dispositivos para el control del tránsito.
- ⇨ Estudio de estacionamientos.

4. *Seguridad*

- ⇨ Cálculo de índices de accidentes y mortalidad.
- ⇨ Evaluación de mejoras por seguridad.

5. *Investigación*

- ⇨ Nuevas metodologías sobre capacidad.
- ⇨ Análisis e investigación en el campo de los accidentes y la seguridad.
- ⇨ Estudio sobre ayudas, programas o dispositivos para el cumplimiento de las normas de tránsito.
- ⇨ Estudios de antes y después.
- ⇨ Estudios sobre el medio ambiente y la energía.

6. *Usos comerciales*

- ⇨ Hoteles y restaurantes.
- ⇨ Urbanismo.

- ⇨ Autoservicios.
- ⇨ Actividades recreacionales y deportivas.

Específicamente, dependiendo de la *unidad de tiempo* en que se expresen los volúmenes de tránsito, éstos se utilizan para [4]:

1. *Los volúmenes de tránsito anual (TA)*

- ⇨ Determinar los patrones de viaje sobre áreas geográficas.
- ⇨ Estimar los gastos esperados de los usuarios de las carreteras.
- ⇨ Calcular índices de accidentes.
- ⇨ Indicar las variaciones y tendencias de los volúmenes de tránsito, especialmente en carreteras de cuota.

2. *Los volúmenes de tránsito promedio diario (TPD)*

- ⇨ Medir la demanda actual en calles y carreteras.
- ⇨ Evaluar los flujos de tránsito actuales con respecto al sistema vial.
- ⇨ Definir el sistema arterial de calles.
- ⇨ Localizar áreas donde se necesite construir nuevas vialidades o mejorar las existentes.
- ⇨ Programar mejoras capitales.

3. *Los volúmenes de tránsito horario (TH)*

- ⇨ Determinar la longitud y magnitud de los períodos de máxima demanda.
- ⇨ Evaluar deficiencias de capacidad.
- ⇨ Establecer controles en el tránsito, como: colocación de señales, semáforos y marcas viales; jerarquización de calles, sentidos de circulación y rutas de tránsito; y prohibición de estacionamiento, paradas y maniobras de vueltas.
- ⇨ Proyectar y rediseñar geométricamente calles e intersecciones.

4. *Las tasas de flujo (q)*

- ⇨ Analizar flujos máximos.
- ⇨ Analizar variaciones del flujo dentro de las horas de máxima demanda.
- ⇨ Analizar limitaciones de capacidad en el flujo de tránsito.
- ⇨ Analizar las características de los volúmenes máximos.

8.4 Características de los volúmenes de tránsito

Los volúmenes de tránsito siempre deben ser considerados como *dinámicos*, por lo que solamente son precisos para el período de duración de los aforos. Sin embargo, debido a que sus variaciones son generalmente rítmicas y repetitivas, es importante tener un conocimiento de sus características, para así programar aforos, relacionar volúmenes en un tiempo y lugar con volúmenes de otro tiempo y lugar, y prever con la debida anticipación la actuación de las fuerzas dedicadas al control del tránsito y labor preventiva, así como las de conservación. Por ejemplo, si se sabe que en Semana Santa se va a tener el mayor número de accidentes de tránsito, se debe planear una campaña preventiva para actuar antes y durante esa semana. Por otro lado, en esta semana no se deben realizar trabajos de reparación normal en la calle o carretera, pues pueden estorbar o resultar peligrosos.

Por lo tanto, es fundamental, en la planeación y operación de la circulación vehicular, conocer las *variaciones* periódicas de los volúmenes de tránsito dentro de las *horas de máxima demanda*, en las *horas del día*, en los *días de la semana* y en los *meses del año*. Aún más, es también importante conocer las variaciones de los volúmenes de tránsito en función de su *distribución por carriles*, su *distribución direccional* y su *composición*.

8.4.1 Distribución y composición del volumen de tránsito

La distribución de los volúmenes de tránsito por *carriles* debe ser considerada, tanto en el proyecto como en la operación de calles y carreteras. Tratándose de tres o más carriles de operación en un sentido, el flujo se semeja a una corriente hidráulica. Así, al medir los volúmenes de tránsito por carril, en zona urbana, la mayor velocidad y capacidad, generalmente se logran en el carril del medio; las fricciones laterales, como paradas de autobuses y taxis y las vueltas izquierdas y derechas causan un flujo más lento en los carriles extremos, llevando el menor volumen el carril cercano a la acera. En carretera, a volúmenes bajos y medios suele ocurrir lo contrario, por lo que se reserva el carril cerca de la faja separadora central para vehículos más rápidos y para rebases, y se presentan mayores volúmenes en el carril inmediato al acotamiento. En autopistas de tres carriles con altos volúmenes de tránsito, rurales o urbanas, por lo general hay mayores volúmenes en el carril inmediato a la faja separadora central.

En cuanto a la distribución *direccional*, en las calles que comunican el centro de la ciudad con la periferia de la misma, el fenómeno común que se presenta en el flujo de tránsito es de volúmenes máximos hacia el centro en la mañana y hacia la periferia en las tardes y noches. Es una situación semejante al flujo y reflujo que se presenta los fines de semana cuando los vacacionistas salen de la ciudad el viernes y sábado y regresan el domingo en la tarde. Este fenómeno se presenta especialmente en arterias del tipo radial. En cambio, ciertas arterias urbanas que comunican "centros de gravedad" importantes, no registran variaciones direccionales muy marcadas en los volúmenes de tránsito. Un ejemplo de éstos puede citarse en el caso del Anillo Periférico de la Ciudad de México, en su tramo entre el Viaducto y Naucalpan, donde la distribución

direccional es bastante equilibrada, tanto en las horas de máxima demanda de la mañana, como en las de la tarde, es decir, no hay mucha diferencia entre los volúmenes en uno u otro sentido.

Igualmente, en los estudios de volúmenes de tránsito muchas veces es útil conocer la *composición* y *variación* de los distintos tipos de vehículos. La composición vehicular se mide en términos de porcentajes con respecto al volumen total. Por ejemplo, porcentaje de *automóviles*, de *autobuses* y de *camiones*. En los países más adelantados, con un mayor grado de motorización, los porcentajes de autobuses y camiones en los volúmenes de tránsito son bajos. En cambio, en países con menor grado de desarrollo, el porcentaje de estos vehículos grandes y lentos es mayor. En nuestro medio, como es el caso de México y Colombia, a nivel rural, es muy común encontrar porcentajes típicos o medios del orden de 60% automóviles, 10% autobuses y 30% camiones, con variaciones de ±10%, dependiendo del tipo de carretera, la hora del día y el día de la semana.

8.4.2 Variación del volumen de tránsito en la hora de máxima demanda

En zonas urbanas, la variación de los volúmenes de tránsito dentro de una misma hora de máxima demanda, para una calle o intersección específica, puede llegar a ser repetitiva y consistente durante varios días de la semana. Sin embargo, puede ser bastante diferente de un tipo de calle o intersección a otro, para el mismo período máximo. En cualquiera de estos casos, es importante conocer la variación del volumen dentro de las horas de máxima demanda y cuantificar la duración de los flujos máximos, para así realizar la planeación de los controles del tránsito para estos períodos durante el día, tales como prohibición de estacionamientos, prohibición de ciertos movimientos de vuelta y disposición de los tiempos de los semáforos.

Un volumen horario de máxima demanda, a menos que tenga una distribución uniforme, no necesariamente significa que se conserve la misma frecuencia del flujo durante toda la hora. Esto significa que existen períodos cortos dentro de la hora con tasas de flujo mucho mayores a las de la hora misma. Para la hora de máxima demanda, se llama *factor de la hora de máxima demanda* $FHMD$, a la relación entre *el volumen horario de máxima demanda* $VHMD$, y el *volumen máximo* $Q_{máx}$, que se presenta durante un período dado dentro de dicha hora. Matemáticamente se expresa como:

$$FHMD = \frac{VHMD}{N(Q_{máx})} \tag{8.11}$$

Donde:

N = número de períodos durante la hora de máxima demanda

Los períodos dentro de la hora de máxima demanda pueden ser de 5, 10 ó 15 minutos, utilizándose éste último con mayor frecuencia, en cuyo caso el factor de la hora de máxima demanda es:

$$FHMD_{15} = \frac{VHMD}{4(Q_{15_{máx}})} \tag{8.12}$$

Para períodos de 5 minutos, el factor de la hora de máxima demanda es:

$$FHMD_5 = \frac{VHMD}{12(Q_{5_{máx}})} \tag{8.13}$$

El factor de la hora de máxima demanda es un indicador de las características del flujo de tránsito en períodos máximos. Indica la forma como están distribuidos los flujos máximos dentro de la hora. Su mayor valor es la unidad, lo que significa que existe una distribución uniforme de flujos máximos durante toda la hora. Valores bastante menores que la unidad indican concentraciones de flujos máximos en períodos cortos dentro de la hora.

Ejemplo 8.2

Un aforo vehicular realizado durante un período de máxima demanda en un punto sobre una vialidad dio como resultado los datos mostrados en la tabla 8.2.

Tabla 8.2 Variación del volumen de tránsito en la hora de máxima demanda

Período (horas:minutos)	Volumen cada 5 minutos (Q_5) (vehículos mixtos)	Período (horas:minutos)	Volumen cada 5 minutos (Q_5) (vehículos mixtos)
17:00-17:05	102	17:00-17:15	314
17:05-17:10	104		
17:10-17:15	108		
17:15-17:20	152	17:15-17:30	476
17:20-17:25	158		
17:25-17:30	166		
17:30-17:35	171	17:30-17:45	550
17:35-17:40	187		
17:40-17:45	192		
17:45-17:50	206	17:45-18:00	693
17:50-17:55	223		
17:55-18:00	264		
18:00-18:05	327	18:00-18:15	825
18:05-18:10	291		
18:10-18:15	207		
18:15-18:20	146	18:15-18:30	363
18:20-18:25	112		
18:25-18:30	105		

En dicha tabla se observa, según el área sombreada, que la hora de máxima demanda corresponde al período entre las 17:15 y las 18:15, con un volumen horario de:

$$VHMD = 476 + 550 + 693 + 825 = 2{,}544 \text{ vehículos mixtos/hora}$$

El volumen máximo para *períodos de 5 minutos* corresponde al de las 18:00-18:05, con un valor de 327 vehículos mixtos. Por lo tanto, el *FHMD*, de acuerdo a la ecuación (8.13), es:

$$FHMD_5 = \frac{VHMD}{12(Q_{5_{máx}})} = \frac{2,544}{12(327)}$$

$$= 0.65$$

De la misma manera, el volumen máximo para *períodos de 15 minutos* corresponde al de las 18:00-18:15, con un valor de 825 vehículos mixtos. En este caso, el *FHMD*, según la ecuación (8.12), es:

$$FHMD_{15} = \frac{VHMD}{4(Q_{15_{máx}})} = \frac{2,544}{4(825)}$$

$$= 0.77$$

El hecho que el $FHMD_5$ sea menor que el $FHMD_{15}$, $(0.65 < 0.77)$, indica que la frecuencia de paso de los vehículos en períodos cortos es mucho más alta; períodos dentro de los cuales se encontrarían los problemas de tránsito, si es que existen. Este fenómeno se puede ver al expresar los flujos máximos, de cada período, en términos horarios así:

$$12(Q_{5_{máx}}) = 12(327)$$

$$= 3,924 \text{ vehículos mixtos/hora}$$

$$4(Q_{15_{máx}}) = 4(825)$$

$$= 3,300 \text{ vehículos mixtos/hora}$$

Vale la pena aclarar, que los valores anteriores no quieren decir que en toda la hora pasen 3,924 vehículos ni 3,300 vehículos, ya que, como se vio anteriormente, el volumen horario real es de 2,544 vehículos. Esto pone de manifiesto de nuevo la importancia de considerar períodos inferiores a una hora en el análisis de flujos vehiculares, pues su frecuencia de paso es mucho mayor que la de los volúmenes horarios propiamente dichos.

Igualmente, el *VHMD* se puede expresar en unidades de volúmenes en períodos inferiores a una hora, de la siguiente manera:

$$VHMD \text{ (como un } Q_5) = \frac{VHMD}{12} = \frac{2,544}{12}$$

$$= 212 \text{ vehículos mixtos/5 minutos}$$

$$VHMD \text{ (como un } Q_{15}) = \frac{VHMD}{4} = \frac{2,544}{4}$$

$$= 636 \text{ vehículos mixtos/15 minutos}$$

La figura 8.2 ilustra gráficamente la variación del volumen de tránsito dentro de la hora de máxima demanda, bajo estos dos conceptos.

Figura 8.2 Variación del volumen de tránsito en la hora de máxima demanda

8.4.3 Variación horaria del volumen de tránsito

Las variaciones de los volúmenes de tránsito a lo largo de las horas del día, dependen del tipo de ruta, según las actividades que prevalezcan en ella, puesto que hay rutas de tipo turístico, agrícola, comercial, etc.

En zonas agrícolas las variaciones horarias dentro de la época de cosecha son extraordinarias; puede ser que en ciertas horas de la noche no haya absolutamente ningún vehículo y, sin embargo, a determinadas horas del día hay tal cantidad de vehículos que pueden llegar a saturar, por ejemplo, una carretera de dos carriles. En el caso de una carretera de tipo turístico, durante los días entre semana existe un trá nsito más o menos normal a lo largo de todas las horas, pero los sábados y domingos puede llegar a volúmenes supremamente altos, encontrándose varias horas del día con demandas máximas. El día sábado, de las 8 de la mañana a las 11 ó 12 el volumen horario es muy grande, en la tarde baja y ya en la noche es bastante pequeño. El domingo, en la mañana presenta volúmenes horarios medianos, y en la tarde máximos en las horas del regreso a la ciudad, ocurriendo largas filas de automóviles. Son variaciones horarias que ocurren en cualquier parte del mundo, que se pueden prever mediante los estudios necesarios.

En las ciudades se tiene una variación típica de la siguiente manera: la madrugada empieza con bajo volumen de vehículos, el cual se va incrementando hasta alcanzar cifras máximas entre las 7:30 y las 9:30 horas. De las 9:30 a las 13:00 horas vuelve a bajar y empieza a ascender para llegar a otro máximo entre las 14:00 y las 15:00 horas. Vuelve de nuevo a disminuir entre las 14:00 y las 18:00 horas, en que asciende otra vez para alcanzar un tercer valor máximo entre las 18:00 y las 20:00 horas. De esta hora en adelante tiende a bajar al mínimo en la madrugada.

La tabla 8.3 y la figura 8.3 muestran la variación horaria del volumen de tránsito en zona rural, en la carretera Querétaro-Irapuato en un tramo del Km 26+000, durante las 24 horas del día jueves 28 de julio de 2005 [5].

En zonas urbanas, para el caso de intersecciones, se acostumbra a tomar los datos de volúmenes de tránsito según sus movimientos direccionales. La figura 8.4 muestra esquemáticamente a escala la representación gráfica de los volúmenes de tránsito direccionales totales durante 11 horas consecutivas (de las 07:00 a las 18:00 horas) para cada uno de los movimientos direccionales del día miércoles 14 de diciembre de 2005 en la intersección Periférico de La Juventud con Calle Haciendas del Valle de la ciudad de Chihuahua [6]. En la tabla 8.4 se presenta la variación horaria a lo largo de las 11 horas en las respectivas ramas de esta intersección, y en la figura 8.5 la variación horaria de los volúmenes en toda la intersección.

8.4.4 Variación diaria del volumen de tránsito

Se han estudiado cuáles son los días de la semana que llevan los volúmenes normales de tránsito. Así para carreteras principales de lunes a viernes los volúmenes son muy estables; los máximos, generalmente se registran durante el fin de semana ya sea

Tabla 8.3 Variación horaria del volumen de tránsito en zona rural, carretera Querétaro-Irapuato, México

VARIACIÓN HORARIA DEL VOLUMEN DE TRÁNSITO Carretera: Querétaro-Irapuato Tramo: Km 26+000 jueves 28 de julio de 2005				
Hora del día	Vehículos en ambos sentidos			
	Automóviles	Autobuses	Camiones	Total
00:00-01:00	42	8	136	186
01:00-02:00	32	2	139	173
02:00-03:00	23	13	140	176
03:00-04:00	33	8	99	140
04:00-05:00	49	3	120	172
05:00-06:00	51	1	108	160
06:00-07:00	114	1	98	213
07:00-08:00	204	4	113	321
08:00-09:00	257	2	96	355
09:00-10:00	226	2	90	318
10:00-11:00	251	3	92	346
11:00-12:00	273	4	103	380
12:00-13:00	268	4	122	394
13:00-14:00	304	4	110	418
14:00-15:00	293	9	124	426
15:00-16:00	331	8	151	490
16:00-17:00	325	6	139	470
17:00-18:00	330	9	136	475
18:00-19:00	306	6	175	487
19:00-20:00	263	13	161	437
20:00-21:00	226	7	151	384
21:00-22:00	133	10	137	280
22:00-23:00	72	3	119	194
23:00-24:00	74	6	149	229
Total	4,480	136	3,008	7,624
Por ciento	58.8%	1.8%	39.5%	100.0%

el sábado o el domingo, debido a que durante estos días por estas carreteras circula una alta demanda de usuarios de tipo turístico y recreacional. En carreteras secundarias de tipo agrícola, los máximos volúmenes se presentan entre semana. En las calles de la ciudad, la variación de los volúmenes de tránsito diario no es muy pronunciada entre semana, esto es, están más o menos distribuidos en los días laborales; sin embargo, los más altos volúmenes ocurren el viernes.

También vale la pena mencionar, con referencia a la variación diaria de los volúmenes de tránsito tanto a nivel urbano como rural, que se presentan máximos en aquellos días de eventos especiales como Semana Santa, Navidad, fin de año, competencias deportivas nacionales e internacionales, etc.

La tabla 8.5 y la figura 8.6 muestran la variación diaria típica del volumen de tránsito en una zona rural, correspondiente a la Autopista Armenia-Manzanillo, México para la semana del 8 al 14 de noviembre del año 2005 [7], en el sentido de circulación hacia Puebla.

Figura 8.3 *Variación horaria del volumen de tránsito, carretera Querétaro-Irapuato, México 2005*

Obsérvese para esta carretera, tal como se mencionó anteriormente, que los máximos volúmenes de tránsito diario tienen lugar el fin de semana.

8.4.5 Variación mensual del volumen de tránsito

Hay meses que las calles y carreteras llevan mayores volúmenes que otros, presentando variaciones notables. Los más altos volúmenes de tránsito se registran en Semana Santa, en las vacaciones escolares y a fin de año por las fiestas y vacaciones navideñas del mes de diciembre. Por esta razón los volúmenes de tránsito promedio diarios que

Figura 8.4 Volúmenes de tránsito direccionales, Chihuahua, México 2005

Tabla 8.4 Variación horaria del volumen de tránsito en zona urbana, Chihuahua, México 2005

Hora	Intersección: Periférico de la Juventud-Calle Haciendas del Valle (vehículos mixtos/hora)								
	Rama de la intersección								Total en la intersección
	①		②		③		④		
	Entran	Salen	Entran	Salen	Entran	Salen	Entran	Salen	
07:00-08:00	946	951	819	464	814	1,025	296	435	2,875
08:00-09:00	532	523	405	257	411	481	137	224	1,485
09:00-10:00	545	539	419	210	541	656	147	247	1,652
10:00-11:00	578	663	362	236	632	599	187	261	1,759
11:00-12:00	652	762	575	230	750	844	181	322	2,158
12:00-13:00	770	869	624	314	771	950	219	251	2,384
13:00-14:00	961	1,015	711	386	967	1,096	199	341	2,838
14:00-15:00	1,006	1,086	724	384	955	1,125	266	356	2,951
15:00-16:00	820	901	690	301	882	1,000	163	353	2,555
16:00-17:00	917	1,126	857	351	1,209	1,221	212	497	3,195
17:00-18:00	833	1,231	1,053	330	1,202	1,151	220	596	3,308
Total 11 horas	8,560	9,666	7,239	3,463	9,134	10,148	2,227	3,883	27,160

Figura 8.5 Variación horaria del volumen de tránsito, intersección Periférico de la Juventud-Calle Haciendas del Valle, Chihuahua, México 2005

caracterizan cada mes son diferentes, dependiendo también, en cierta manera, de la categoría y del tipo de servicio que presten las calles y carreteras. Sin embargo, el patrón de variación de cualquier vialidad no cambia grandemente de año a año, a menos que ocurran cambios importantes en su diseño, en los usos de la tierra, o se construyan nuevas calles o carreteras que funcionen como alternas.

En la tabla 8.6 y en la figura 8.7 se ilustra la variación mensual del volumen de tránsito en ambos sentidos durante el año 2004 en la autopista Puebla-Atlixco [7].

Tabla 8.5 Variación diaria del volumen de tránsito en zona rural, Autopista Armenia-Manzanillo

VARIACIÓN DIARIA DEL VOLUMEN DE TRÁNSITO Carretera: Autopista Armenia-Manzanillo (caseta de cobro) Sentido: Hacia Puebla noviembre 8-noviembre 14 de 2005				
Día de la semana	Vehículos por sentido			
	Automóviles	Autobuses	Camiones	Total
Lunes	1,003	81	194	1,278
Martes	804	75	204	1,083
Miércoles	754	68	192	1,014
Jueves	809	64	206	1,079
Viernes	1,091	85	213	1,389
Sábado	1,377	96	163	1,636
Domingo	1,607	110	114	1,831
Total	7,445	579	1,286	9,310
Por ciento	80.0%	6.2%	13.8%	100.0%

Figura 8.6 Variación diaria del volumen de tránsito, autopista Armenia-Manzanillo, México 2005

Tabla 8.6 Variación mensual del volumen de tránsito en zona rural, Autopista Puebla-Atlixco

VARIACIÓN MENSUAL DEL VOLUMEN DE TRÁNSITO Carretera: Autopista Puebla-Atlixco Ambos sentidos Año: 2004				
Mes del año	Vehículos en ambos sentidos			
	Automóviles	Autobuses	Camiones	Total
Enero	298,529	5,049	13,649	317,227
Febrero	290,941	5,031	13,621	309,593
Marzo	308,317	6,247	16,729	331,293
Abril	340,145	5,165	15,197	360,507
Mayo	326,680	5,275	15,755	347,710
Junio	292,398	5,059	15,182	312,639
Julio	341,990	5,532	17,013	364,535
Agosto	330,292	5,990	18,206	354,488
Septiembre	304,382	8,520	26,502	339,404
Octubre	330,580	9,713	29,764	370,057
Noviembre	325,531	9,252	27,872	362,655
Diciembre	372,427	9,786	29,658	411,871
Total	3,862,212	80,619	239,148	4,181,979
Por ciento	92.4%	1.9%	5.7%	100.0%

Figura 8.7 *Variación mensual del volumen de tránsito, autopista Puebla-Atlixco, México 2004*

8.5 Volúmenes de tránsito futuros

8.5.1 Relación entre el volumen horario de proyecto y el tránsito promedio diario anual

Si se hiciera una lista de los volúmenes de tránsito horario que se presentan en el año, en orden descendente, sería posible determinar los volúmenes horarios de la 10a, 20ava, 30ava, 50ava, 70ava o 100ava hora de máximo volumen. Una guía para determinar el *volumen horario de proyecto VHP*, es precisamente una curva que indique la variación de los volúmenes de tránsito horario durante el año. La figura 8.8 [8] muestra tres curvas que relacionan los volúmenes horarios más altos del año y el *tránsito promedio diario anual TPDA*, de las *carreteras nacionales*.

Estas curvas también indican que los volúmenes de tránsito horario en una *carretera* presentan una amplia distribución durante el año y que, en términos generales, la mayor parte del volumen de tránsito ocurre durante un número relativamente pequeño de horas.

Figura 8.8 *Relaciones entre los volúmenes horarios más altos del año y el tránsito promedio diario anual TPDA*

(Fuente: *Manual de Proyecto Geométrico de Carreteras.* México, 1991.)

Comúnmente se utiliza el volumen de la 30ava hora, *estimado al futuro*, para fines de proyecto. Por lo tanto, como se puede apreciar en estas curvas, el volumen horario de proyecto para esta hora está comprendido entre el 8% y el 16% del *TPDA*. Así para *carreteras suburbanas*, el volumen de proyecto de la 30ava hora es aproximadamente el 57% de la hora de máximo volumen (8% ÷ 14%), para *carreteras rurales secundarias* el 46% (12% ÷ 26%) y para *carreteras rurales principales* el 42% (16% ÷ 38%). Estos porcentajes significan un ahorro considerable en el proyecto de la sección transversal con un buen criterio en la selección del volumen horario pronosticado. En ocasiones quizá convenga considerar la 50ava hora de máximo volumen, como norma de proyecto, en condiciones de presupuestos muy limitados.

De acuerdo a lo anterior en los proyectos de *carreteras*, el *volumen horario de proyecto VHP*, para el año de proyecto en función del *tránsito promedio diario anual TPDA*, se expresa como:

$$VHP = k(TPDA) \tag{8.14}$$

Donde:

k = valor esperado de la relación entre el volumen de la $n-ava$ hora máxima seleccionada y el *TPDA* del año de proyecto

Por lo tanto, tomando como referencia las tres curvas anteriores, si se selecciona el volumen de la 30ava hora como el de proyecto, para proyecciones a años futuros en carreteras, se recomiendan los siguientes valores de k:

Para carreteras suburbanas: $k = 0.08$
Para carreteras rurales secundarias: $k = 0.12$
Para carreteras rurales principales: $k = 0.16$

8.5.2 Relación entre los volúmenes de tránsito promedio diario, anual y semanal

El comportamiento de cualquier fenómeno o suceso estará naturalmente mucho mejor caracterizado cuando se analiza todo su universo. En este caso, el tamaño de su población está limitado en el espacio y en el tiempo por las variables asociadas al mismo.

Con respecto a volúmenes de tránsito, para obtener el *tránsito promedio diario anual* $TPDA$, como se vio anteriormente es necesario disponer del número total de vehículos que pasan durante el año por el punto de referencia, mediante aforos continuos a lo largo de todo el año, ya sea en períodos horarios, diarios, semanales o mensuales. Muchas veces, esta información anual es difícil de obtener, al menos en todas las vialidades, por los costos que ello implica. Sin embargo, se pueden conseguir datos en las casetas de cobro para las carreteras de cuota y mediante contadores automáticos instalados en estaciones maestras de la gran mayoría de las carreteras de la red vial primaria de la nación.

En estas situaciones, *muestras* de los datos sujetas a las mismas técnicas de análisis permiten generalizar el comportamiento de la *población*. No obstante, antes de que los resultados se puedan generalizar, se debe analizar la variabilidad de la muestra para así estar seguros, con cierto nivel de confiabilidad, que ésta se puede aplicar a otro número de casos no incluidos, y que forman parte de las características de la población.

Por lo anterior, en el análisis de volúmenes de tránsito, la *media poblacional* o *tránsito promedio diario anual* $TPDA$, se estima con base en la *media muestral* o *tránsito promedio diario semanal* $TPDS$, según la siguiente expresión:

$$TPDA = TPDS \pm A \tag{8.15}$$

Donde:

A = máxima diferencia entre el $TPDA$ y el $TPDS$

Como se observa, el valor de A, sumado o restado del $TPDS$, define el *intervalo de confianza* dentro del cual se encuentra el $TPDA$. Para un determinado *nivel de confiabilidad*, el valor de A es:

$$A = KE \tag{8.16}$$

Donde:

K = número de desviaciones estándar correspondiente al nivel de confiabilidad deseado

E = error estándar de la media

Estadísticamente se ha demostrado que las *medias* de diferentes muestras, tomadas de la misma población, se distribuyen *normalmente* alrededor de la media poblacional con una *desviación estándar* equivalente al *error estándar*. Por lo tanto, también se puede escribir que:

$$E = \hat{\sigma} \tag{8.17}$$

Donde:

$\hat{\sigma}$ = estimador de la desviación estándar poblacional (σ)

Una expresión para determinar el *valor estimado* de la *desviación estándar poblacional* $\hat{\sigma}$, es la siguiente:

$$\hat{\sigma} = \frac{S}{\sqrt{n}}\left(\sqrt{\frac{N-n}{N-1}}\right) \tag{8.18}$$

Donde:

S = desviación estándar de la distribución de los volúmenes de tránsito diario o desviación estándar muestral

n = tamaño de la muestra en número de días del aforo

N = tamaño de la población en número de días del año

La *desviación estándar muestral* S, se calcula como:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(TD_i - TPDS)^2}{n-1}} \tag{8.19}$$

Donde:

TD_i = volumen de tránsito del día i

Finalmente, la relación entre los volúmenes de tránsito promedio diario anual y semanal es:

$$TPDA = TPDS \pm A = TPDS \pm KE$$

$$TPDA = TPDS \pm K\hat{\sigma} \tag{8.20}$$

En la *distribución normal*, para niveles de confiabilidad del 90% y 95% los valores

de la constante K son 1.64 y 1.96, respectivamente.

Otro enfoque [9] dice que, en estudios de volúmenes de tránsito sobre una población normal, generalmente no se conoce ni su media poblacional μ ($TPDA$) ni su varianza poblacional σ^2. Si $TPDS$ y S^2 son la media muestral y la varianza muestral insesgada respectivamente, obtenidas de una muestra aleatoria de tamaño n (7 días) tomada de una población normal, se sabe que la estadística:

$$T = \frac{TPDS - TPDA}{\frac{S}{\sqrt{n}}}$$

Tiene una distribución t *de Student* con $n-1$ grados de libertad. T permite la construcción de un intervalo de confianza para el $TPDA$. De acuerdo con la figura 8.9, dado el coeficiente de confianza $1-\alpha$, es fácil obtener el valor de $t_{\alpha/2}$ de una tabla de la distribución t.

$t_{\alpha/2}$ es el valor de la distribución con $n-1$ grados de libertad, arriba del cual se obtiene un área de $\alpha/2$. Por la simetría de la curva, un área igual a $\alpha/2$ caerá a la izquierda de $-t_{\alpha/2}$.

Figura 8.9 Propiedad de simetría de la distribución t de student

El intervalo de confianza se expresa así:

$$P\left[-t_{\alpha/2} \le T \le t_{\alpha/2}\right] = 1-\alpha$$

$$P\left[-t_{\alpha/2} \le \frac{TPDS - TPDA}{\frac{S}{\sqrt{n}}} \le t_{\alpha/2}\right] = 1-\alpha$$

$$P\left[-t_{\alpha/2}\frac{S}{\sqrt{n}} \le TPDS - TPDA \le t_{\alpha/2}\frac{S}{\sqrt{n}}\right] = 1-\alpha$$

$$P\left[-t_{\alpha/2}\frac{S}{\sqrt{n}}-TPDS\leq -TPDA\leq t_{\alpha/2}\frac{S}{\sqrt{n}}-TPDS\right]=1-\alpha$$

De donde, el intervalo de confianza para el *TPDA* es:

$$TPDS-t_{\alpha/2}\frac{S}{\sqrt{n}}\leq TPDA\leq TPDS+t_{\alpha/2}\frac{S}{\sqrt{n}} \qquad (8.21)$$

Ejemplo 8.3

Se desea determinar, para el nivel de confiabilidad del 90%, los intervalos en que se encuentra el *TPDA* en función del *TPDS*, utilizando los volúmenes diarios totales dados anteriormente en la tabla 8.5 para la autopista Armenia-Manzanillo.

Según la tabla 8.5, los *volúmenes diarios totales* en el sentido hacia Puebla para los siete días desde el lunes hasta el domingo son:

1,278 1,083 1,014 1,079 1,389 1,639 1,831

Utilizando la estimación por intervalos, según la *distribución normal*, se tiene lo siguiente:

Tránsito promedio diario semanal: *TPDS*

$$TPDS=\frac{TS}{7}=\frac{1{,}278+1{,}083+...+1{,}831}{7}=\frac{9{,}310}{7}=1{,}330\ \text{vehículos mixtos/día}$$

Desviación estándar muestral: *S*

Según la ecuación (8.19), se tiene:

$$S=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(TD_i-TPDS)^2}{n-1}}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{7}(TD_i-1{,}330)^2}{7-1}}$$

$$=\sqrt{\frac{(1{,}278-1{,}330)^2+(1{,}083-1{,}330)^2+...+(1{,}831-1{,}330)^2}{6}}$$

$$=310\ \text{vehículos mixtos/día}$$

Desviación estándar poblacional estimada: $\hat{\sigma}$

De acuerdo con la ecuación (8.18), se tiene:

$$\hat{\sigma} = \frac{S}{\sqrt{n}}\left(\sqrt{\frac{N-n}{N-1}}\right) = \frac{310}{\sqrt{7}}\left(\sqrt{\frac{365-7}{365-1}}\right)$$

$$= 116 \text{ vehículos mixtos/día}$$

Intervalos del TPDA:

Para el nivel de confiabilidad del 90%, $K = 1.64$. Entonces, según la ecuación (8.20):

$$TPDA = TPDS \pm K\hat{\sigma} = 1{,}330 \pm 1.64(116)$$

$$= 1{,}330 \pm 190 \text{ vehículos mixtos/día}$$

Esto significa que el valor máximo que puede tomar el $TPDA$ es:

$$TPDA = 1{,}330 + 190$$

$$= 1{,}520 \text{ vehículos mixtos/día}$$

Y el valor mínimo es:

$$TPDA = 1{,}330 - 190$$

$$= 1{,}140 \text{ vehículos mixtos/día}$$

El intervalo de confianza del $TPDA$, se expresa de la siguiente manera:

$$1{,}140 \text{ vehículos mixtos/día} \leq TPDA \leq 1{,}520 \text{ vehículos mixtos/día}$$

Ahora, utilizando la estimación por intervalos, según la *distribución t de student*, se tiene:

$$1 - \alpha = 0.90$$

$$\alpha = 0.10$$

$$\frac{\alpha}{2} = 0.05$$

De una tabla de la distribución t de student, para $\alpha/2 = 0.05$ y $7 - 1 = 6$ grados de libertad, se tiene que:

$$t_{\alpha/2} = 1.943$$

Por lo tanto, el intervalo de confianza del $TPDA$, según la ecuación (8.21) es:

$$TPDS - t_{\alpha/2}\frac{S}{\sqrt{n}} \leq TPDA \leq TPDS + t_{\alpha/2}\frac{S}{\sqrt{n}}$$

$$1{,}330 - 1.943\frac{310}{\sqrt{7}} \leq TPDA \leq 1{,}330 + 1.943\frac{310}{\sqrt{7}}$$

$$1{,}330 - 228 \leq TPDA \leq 1{,}330 + 228$$

$1{,}702$ vehículos mixtos/día $\leq TPDA \leq 1{,}558$ vehículos mixtos/día

Como puede observarse, la estimación del *TPDA*, el intervalo de confianza según la distribución t de student es un poco mayor que el de la distribución normal.

8.5.3 Ajuste y expansión de volúmenes de tránsito

Los dos numerales descritos anteriormente indican las relaciones que existen entre los volúmenes de tránsito. El primero, relaciona volúmenes de tránsito horarios (*TH* y *VHP*) con volúmenes diarios en términos de tránsito promedio diario anual (*TPDA*), y el segundo relaciona volúmenes obtenidos por muestreos (*TPDS*) con volúmenes poblacionales (*TPDA*).

También se mencionó que, en la mayoría de las vialidades, no siempre se dispone de toda la información de volúmenes a través de períodos largos como, por ejemplo, un año. Por lo tanto, es necesario contar con *estaciones maestras* de *aforo permanente* o *periódico*, que permitan determinar *factores de expansión* y *ajuste* aplicables a otros lugares que tengan comportamientos similares y en los cuales se efectuarían aforos en períodos cortos.

Los *aforos continuos* proporcionan información muy importante con respecto a los *patrones de variación* horaria, diaria, periódica o anual del volumen de tránsito. El tránsito tiende a tener variaciones cíclicas predecibles, por lo que a través de una clasificación adecuada de las vialidades y los aforos, es posible establecer el patrón básico de variación del volumen de tránsito para cada tipo de carretera o calle [10]. Más aún, si bien los valores de los volúmenes específicos para determinados períodos (minutos, horas, días) pueden llegar a ser bastante diferentes de un lugar a otro, su *proporción* en el tiempo con respecto a los totales o promedios, es en muchos casos, *constante* o *consistente*. Estas propiedades, son las que sustentan el uso de factores de expansión y ajuste en la *estimación* de volúmenes para otros lugares y otros períodos de tiempo.

1. Ajuste de volúmenes de tránsito a nivel urbano [1]

Se trata de producir datos que definan los patrones de flujo en toda una red urbana durante un intervalo común de tiempo. Generalmente, no es posible aforar en todos los tramos al mismo tiempo, debido a limitaciones de personal, recursos y equipo. Para tal efecto se utiliza la técnica de muestreo, mediante la definición de estaciones maestras o de control, en las cuales se afora durante períodos largos, para monitorear las variaciones del flujo, para de esta manera ajustar los aforos en las demás estaciones (de cobertura o no maestras) donde se han tomado datos en períodos cortos.

Ejemplo 8.4

Mediante este ejemplo se ilustra el procedimiento para realizar el ajuste y expansión de volúmenes de tránsito en estaciones de cobertura a partir de estaciones

maestras. Para tal efecto, en la figura 8.10, se muestra una parte de una zona urbana, compuesta de una estación de control o maestra M y seis estaciones de cobertura. En la tabla 8.7, se presentan los volúmenes de tránsito horarios TH, para las 24 horas en la estación maestra M y para una hora específica en cada una de las seis estaciones de cobertura.

Figura 8.10 *Estudio de volúmenes de tránsito en una red urbana*

(Fuente: Adaptado de Roess, R., Prassas, E. y Mcshane, W. *Traffic Engineering.* New Jersey, 2004.)

Como se planteó anteriormente, los volúmenes horarios se pueden expresar como una proporción de los volúmenes diarios, de la siguiente manera:

$$(P_i)_M = \frac{(TH_i)_M}{(TD)_M} \tag{8.22}$$

Donde:

$(P_i)_M =$ proporción del volumen de tránsito de la hora i con respecto al volumen de tránsito diario en la estación maestra M

$(TH_i)_M =$ volumen de tránsito de la hora i en la estación maestra M

$(TD)_M =$ volumen de tránsito diario en la estación maestra M

En la tabla 8.8 se presentan las proporciones horarias en la estación maestra M. Si este patrón se aplica a las demás estaciones, entonces en la estación de cobertura ① que fue aforada sólo de 7 AM a 8 AM, se espera que su volumen horario $(TH_{7-8})_1$ sea el 0.077 (7.7%) de su volumen de tránsito diario $(TD)_1$, esto es:

$$(TH_{7-8})_1 = 0.077(TD)_1$$

Tabla 8.7 Datos de volúmenes de tránsito horarios en una estación maestra y en estaciones de cobertura

Hora	Estación Maestra	Estaciones de cobertura					
		①	②	③	④	⑤	⑥
	Tránsito Horario $(TH_i)_M$	Tránsito Horario $(TH_i)_C$					
0-1	80						
1-2	70						
2-3	50						
3-4	50						
4-5	120						
5-6	400						
6-7	620						
7-8	842	428					
8-9	768						
9-10	614						
10-11	528				510		
11-12	586						
12-13	635						
13-14	651		315				
14-15	672						
15-16	615						
16-17	523					642	
17-18	614						
18-19	792						
19-20	713			577			
20-21	422						
21-22	280						
22-23	153						123
23-24	110						
	$(TD)_M = \sum_{i=1}^{24} (TH_i)_M$ $= 10{,}908\ veh/día$						

De donde:

$$(TD)_1 = \frac{(TH_{7-8})_1}{0.077} = \frac{428}{0.077}$$

$$= 5{,}558\ veh/día$$

Por lo tanto, el volumen de tránsito horario de cualquier hora $(TH_i)_1$, en la estación de cobertura ①, se puede estimar como:

$$(TH_i)_1 = \frac{(TH_i)_M}{(TD)_M}(TD)_1$$

$$(TH_i)_1 = (P_i)_M (TD)_1 \qquad (8.23)$$

De esta manera, en la tabla 8.8 también se presenta la expansión de los volúmenes de tránsito horarios para todo el día en la estación de cobertura ①.

Tabla 8.8 Proporciones de los volúmenes horarios en la estación maestra y expansión de los volúmenes horarios para la estación de cobertura ①

Hora	Tránsito Horario Estación maestra $(TH_i)_M$	Proporción horaria Estación maestra $(P_i)_M = \frac{(TH_i)_M}{(TD)_M}$	Tránsito horario Estación de cobertura ① $(TH_i)_f = (P_i)_M (TD)_f$
0-1	80	80/10,908=0.007	0.007(5,558)=39
1-2	70	70/10,908=0.006	0.006(5,558)=33
2-3	50	50/10,908=0.005	0.005(5,558)=28
3-4	50	50/10,908=0.005	0.005(5,558)=28
4-5	120	120/10,908=0.011	0.011(5,558)=61
5-6	400	400/10,908=0.037	0.037(5,558)=206
6-7	620	620/10,908=0.057	0.057(5,558)=317
7-8	842	842/10,908=0.077	0.077(5,558)=428
8-9	768	768/10,908=0.070	0.070(5,558)=389
9-10	614	614/10,908=0.056	0.056(5,558)=311
10-11	528	528/10,908=0.048	0.048(5,558)=267
11-12	586	586/10,908=0.054	0.054(5,558)=300
12-13	635	635/10,908=0.058	0.058(5,558)=322
13-14	651	651/10,908=0.060	0.060(5,558)=333
14-15	672	672/10,908=0.062	0.062(5,558)=345
15-16	615	615/10,908=0.056	0.056(5,558)=311
16-17	523	523/10,908=0.048	0.048(5,558)=267
17-18	614	614/10,908=0.056	0.056(5,558)=311
18-19	792	792/10,908=0.073	0.073(5,558)=406
19-20	713	713/10,908=0.065	0.065(5,558)=361
20-21	422	422/10,908=0.039	0.039(5,558)=217
21-22	280	280/10,908=0.026	0.026(5,558)=145
22-23	153	153/10,908=0.014	0.014(5,558)=78
23-24	110	110/10,908=0.010	0.010(5,558)=56
	$(TD)_M = 10{,}908$ veh/día	$\sum (P_i)_M = 1.000$	$(TD)_f = \sum (TH_i)_f = 5{,}558$ veh/día

2. *Ajuste de volúmenes de tránsito a nivel rural*

El ajuste que con mayor frecuencia se usa, consiste en transformar un aforo de 24 horas de un día y mes específicos, *volumen de tránsito diario* TD_i, a volumen de *tránsito promedio diario* TPD, lo cual se consigue mediante la siguiente relación:

$$TPD = TD_i (F_m)(F_d) \tag{8.24}$$

Donde:

F_m = factor de ajuste mensual

F_d = factor de ajuste diario

Ejemplo 8.5

Este ejemplo ilustra el cálculo de los factores de ajuste mensual y diario, y su aplicación en la estimación de volúmenes de tránsito promedio diario. Para tal efecto, considérese la variación mensual del volumen total de vehículos, dada anteriormente en la tabla 8.6 para la autopista Puebla-Atlixco en ambos sentidos, durante el año 2004.

Con apoyo en esta información, se elabora la tabla 8.9 para determinar los *factores mensuales*.

Tabla 8.9 Ajuste por variaciones periódicas, de temporada o mensuales de los volúmenes

VARIACIÓN MENSUAL DEL VOLUMEN TOTAL DE TRÁNSITO Carretera: Autopista Puebla-Atlixco Ambos sentidos Año: 2004				
Mes del año	TM_m **(veh/mes)**	$TPDM_m$ **(veh/mes)**	$\frac{TPDM_m}{TPDA}$	**Factor mensual** F_m
Enero	317,227	10,233	0.89	1.12
Febrero	309,593	10,676	0.93	1.08
Marzo	331,293	10,687	0.93	1.08
Abril	360,507	12,017	1.05	0.95
Mayo	347,710	11,216	0.98	1.02
Junio	312,639	10,421	0.91	1.10
Julio	364,535	11,759	1.03	0.97
Agosto	354,488	11,435	1.00	1.00
Septiembre	339,404	11,313	0.99	1.01
Octubre	370,057	11,937	1.04	0.96
Noviembre	362,655	12,089	1.06	0.94
Diciembre	411,871	13,286	1.16	0.86
Total	4,181,871	137,069	-	-

Obsérvese de nuevo que el *TPDA* es:

$$TPDA = \frac{TA}{365} = \frac{\sum_{m=1}^{12} TM_m}{365} = \frac{TM_1 + TM_2 + \ldots + TM_{12}}{365}$$

$$= \frac{317{,}227 + 309{,}593 + \ldots + 411{,}871}{365} = \frac{4{,}181{,}871}{365}$$

$$= 11{,}457 \text{ vehículos mixtos/día}$$

El *TPDA* también se puede obtener así:

$$TPDA = \frac{\sum_{m=1}^{12} TPDM_m}{12} = \frac{TPDM_1 + TPDM_2 + \ldots + TPDM_{12}}{12}$$

$$= \frac{10{,}233 + 10{,}676 + \ldots + 13{,}286}{12} = \frac{137{,}069}{12}$$

$$= 11{,}422 \text{ vehículos mixtos/día}$$

La pequeña diferencia entre los dos valores anteriores se debe a los redondeos efectuados en los *TPDM*.

El *TPDM* expresado porcentualmente con respecto al *TPDA* es:

$$\frac{TPDM_m}{TPDA}$$

Para el mes de octubre se tiene:

$$\frac{TPDM_{octubre}}{TPDA} = \frac{11{,}937}{11{,}457} = 1.04$$

El factor de ajuste para pasar del $TPDM_m$ al $TPDA$, denominado *factor mensual* F_m, que tiene en cuenta la *variación mensual* del volumen de tránsito a lo largo de todo el *año*, se define como:

$$F_m = \frac{1}{\frac{TPDM_m}{TPDA}} = \frac{TPDA}{TPDM_m} \tag{8.25}$$

Para el mes de Octubre:

$$F_{octubre} = \frac{1}{1.04} = 0.96$$

Sobre esta misma carretera, en la tabla 8.10 se muestran los volúmenes totales diarios para la semana del lunes 8 de noviembre al domingo 14 de noviembre del año 2005. También se ilustra el cálculo del factor de ajuste para pasar del TD_d al $TPDS$, denominado *factor diario* F_d, el cual tiene en cuenta la *variación diaria* del volumen de tránsito en la *semana*, y que se define como:

$$F_d = \frac{1}{\frac{TD_d}{TPDS}} = \frac{TPDS}{TD_d} \tag{8.26}$$

Tabla 8.10 Ajuste por variación diaria de los volúmenes en la semana

VARIACIÓN DIARIA DEL VOLUMEN TOTAL DE TRÁNSITO Carretera: Autopista Armenia-Manzanillo (caseta de cobro) Sentido: Hacia Puebla noviembre 8-noviembre 14 de 2005			
Día de la semana	TD_d (veh/día)	$\frac{TD_d}{TPDS}$	Factor diario F_d
Lunes	1,278	0.96	1.04
Martes	1,083	0.81	1.23
Miércoles	1,014	0.76	1.32
Jueves	1,079	0.81	1.23
Viernes	1,389	1.04	0.96
Sábado	1,636	1.23	0.81
Domingo	1,831	1.38	0.72
Total	9,310	-	-

El tránsito promedio diario semanal es:

$$TPDS = \frac{TS}{7} = \frac{9{,}310}{7}$$

$$= 1{,}330 \text{ vehículos mixtos/día}$$

El factor diario para el día viernes es:

$$F_{viernes} = \frac{1}{1.04} = 0.96$$

Ahora supóngase que el día viernes 10 de noviembre de 2006 se realiza un aforo durante las 24 horas dando como resultado 2,800 vehículos mixtos por día. Se quiere estimar el volumen de tránsito promedio diario que debería tomarse para propósitos de análisis operacional o de proyecto.

De acuerdo a la ecuación (8.24) el tránsito promedio diario se estima como:

$$TPD = TD_i(F_m)(F_d) = TD_{viernes}(F_{noviembre})(F_{viernes})$$

$$= 2{,}800(0.94)(0.96) = 2{,}527 \text{ vehículos mixtos/día}$$

8.5.4 Pronóstico del volumen de tránsito futuro

El pronóstico del volumen de tránsito futuro, por ejemplo el *TPDA* del año de proyecto, en la construcción de una nueva carretera o el mejoramiento de una carretera existente, deberá basarse no solamente en los volúmenes normales actuales, sino también en los incrementos del tránsito que se espera utilicen la nueva carretera o la existente.

El Instituto Nacional de Vías de Colombia en su Manual de Diseño Geométrico para Carreteras [11], clasifica los proyectos de carreteras así:

- ***Proyectos de construcción***: es el conjunto de todas las obras de infraestructura a ejecutar en una carretera nueva proyectada, o en un tramo faltante mayor al 30% de una carretera existente y/o en variantes (libramientos).

- ***Proyectos de mejoramiento:*** consiste básicamente en el cambio de especificaciones y dimensiones de la carretera o puentes; para lo cual, se hace necesaria la construcción de obras en infraestructura ya existente, que permitan una adecuación de la carretera a los niveles de servicio requeridos por el tránsito actual y proyectado.

- ***Proyectos de rehabilitación***: actividades que tienen por objeto reconstruir o recuperar las condiciones iniciales de la carretera, de manera que se cumplan las especificaciones técnicas con que fue diseñada.

- ***Proyectos de mantenimiento rutinario***: se refiere a la conservación continua (a intervalos menores a un año) de las zonas laterales, y a intervenciones de emergencias en la carretera, con el fin de mantener las condiciones óptimas para su transitabilidad.

- ***Proyectos de mantenimiento periódico***: comprende la realización de actividades de conservación a intervalos variables, relativamente prolongados (3 a 5 años), destinados primordialmente a recuperar los deterioros de la capa de rodadura ocasionados por el tránsito y los fenómenos climáticos. También podrá contemplar la construcción de algunas obras de drenaje y de protección faltantes en la carretera.

Los volúmenes de *tránsito futuro* TF, para efectos de proyecto se derivan a partir del *tránsito actual* TA, y del *incremento del tránsito* IT, esperado al final del período o año meta seleccionado. De acuerdo a esto, se puede plantear la siguiente expresión:

$$TF = TA + IT \tag{8.27}$$

El *tránsito actual* TA, es el volumen de tránsito que usará la nueva carretera o mejorada en el momento de darse completamente al servicio. En el mejoramiento de una carretera existente, el tránsito actual se compone del *tránsito existente* TE, antes de la mejora, más el *tránsito atraído* TAt, a ella de otras carreteras una vez finalizada su reconstrucción total. En el caso de la apertura de una nueva carretera, el tránsito actual se compone completamente de tránsito atraído.

El *tránsito actual* TA, se puede establecer a partir de aforos vehiculares sobre las vialidades de la región que influyan en la nueva carretera, estudios de origen y destino, o utilizando parámetros socioeconómicos que se identifiquen plenamente con la economía de la zona. En áreas rurales cuando no se dispone de estudios de origen y destino ni datos de tipo económico, para estudios preliminares es suficiente la utilización de las series históricas de los aforos vehiculares en términos de los volúmenes de tránsito promedio diario anual $TPDA$, representativos de cada año.

De esta manera, el *tránsito actual* TA, se expresa como:

$$TA = TE + TAt \tag{8.28}$$

Para la estimación del *tránsito atraído* TAt, se debe tener un conocimiento completo de las condiciones locales, de los orígenes y destinos vehiculares y del grado de atracción de todas las vialidades comprendidas. A su vez, la cantidad de tránsito atraído depende de la capacidad y de los volúmenes de las carreteras existentes, así por ejemplo, si ellas están saturadas o congestionadas, la atracción será mucho más grande. Los usuarios, componentes del tránsito atraído a una nueva carretera, no cambian ni su origen, ni su destino, ni su modo de viaje, pero la eligen motivados por una mejora en los tiempos de recorrido, en la distancia, en las características geométricas, en la comodidad y en la seguridad. Como no se cambia su modo de viaje, a este volumen de tránsito también se le denomina *tránsito desviado*.

El *incremento del tránsito* IT, es el volumen de tránsito que se espera use la nueva carretera en el año futuro seleccionado como de proyecto. Este incremento se compone del *crecimiento normal del tránsito* CNT, del *tránsito generado* TG, y del *tránsito desarrollado* TD.

El *crecimiento normal del tránsito* CNT, es el incremento del volumen de tránsito debido al aumento normal en el uso de los vehículos. El deseo de las personas por movilizarse, la flexibilidad ofrecida por el vehículo y la producción industrial de más vehículos cada día, hacen que esta componente del tránsito siga aumentando. Sin embargo, deberá tenerse gran cuidado en la utilización de los indicadores del crecimiento del parque vehicular nacional para propósitos de proyecto, ya que ellos no necesariamente reflejan las tasas de crecimiento en el área local bajo estudio, aunque se ha comprobado que existe cierta correlación entre el crecimiento del parque vehicular y el crecimiento del $TPDA$.

El *tránsito generado* TG, consta de aquellos viajes vehiculares, distintos a los del transporte público, que no se realizarían si no se construye la nueva carretera. El tránsito generado se compone de tres categorías: el *tránsito inducido*, o nuevos viajes no realizados previamente por ningún modo de transporte; el *tránsito convertido*, o nuevos viajes que previamente se hacían masivamente en taxi, autobús, tren, avión o barco, y que por razón de la nueva carretera se harían en vehículos particulares; y el *tránsito trasladado*, consistente en viajes previamente hechos a destinos completamente diferentes, atribuibles a la atracción de la nueva carretera y no al cambio en el uso del suelo. Al tránsito generado se le asignan tasas de incremento entre el 5% y el 25% del tránsito actual, con un período de generación de uno o dos años después de que la carretera ha sido abierta al servicio.

El *tránsito desarrollado* TD, es el incremento del volumen de tránsito debido a las mejoras en el suelo adyacente a la carretera. A diferencia del tránsito generado, el tránsito desarrollado continúa actuando por muchos años después que la nueva carretera ha sido puesta al servicio. El incremento del tránsito debido al desarrollo normal del suelo adyacente forma parte del crecimiento normal del tránsito, por lo tanto este no se considera como una parte del tránsito desarrollado. Pero la experiencia indica que en carreteras construidas con altas especificaciones, el suelo lateral tiende a desarrollarse más rápidamente de lo normal, generando un tránsito adicional el cual se considera como tránsito desarrollado, con valores del orden del 5% del tránsito actual.

Por lo tanto, el *incremento del tránsito* IT, se expresa así:

$$IT = CNT + TG + TD \tag{8.29}$$

Reemplazando las ecuaciones (8.28) y (8.29) en la ecuación (8.27), se tiene:

$$TF = (TE + TAt) + (CNT + TG + TD) \tag{8.30}$$

En la figura 8.11, se ilustran estos cinco componentes del tránsito futuro.

Figura 8.11 Componentes del volumen de tránsito futuro

También se define el *factor de proyección* FP, del tránsito como la relación del TF al TA:

$$FP = \frac{TF}{TA} \tag{8.31}$$

$$FP = \frac{TA + IT}{TA} = \frac{TA + CNT + TG + TD}{TA}$$

$$FP = 1 + \frac{CNT}{TA} + \frac{TG}{TA} + \frac{TD}{TA} \tag{8.32}$$

El *factor de proyección* FP, deberá especificarse para cada año futuro. El valor utilizado en el pronóstico del tránsito futuro para nuevas vialidades, sobre la base de un período de proyecto de 20 años, está en el intervalo de 1.5 a 2.5. Conocido el factor de proyección, el *tránsito futuro* TF, de acuerdo a la ecuación (8.31) se calcula mediante la siguiente expresión:

$$TF = FP(TA) \tag{8.33}$$

Para obtener estimativos confiables de los volúmenes vehiculares que circularán en el futuro, por libramientos o vialidades alternas, se utilizan *modelos de asignación de*

tránsito, los cuales son alimentados por las demandas pronosticadas, las que a su vez se estiman con *modelos de demanda*. Estos se calibran utilizando parámetros socioeconómicos (como la población total, la población económicamente activa, la población ocupada y los vehículos registrados) y las demandas actuales obtenidas a través de encuestas de origen y destino. Por lo general, la asignación es de tipo probabilística con base en una función de utilidad que toma en cuenta el tiempo de recorrido, las tarifas, los costos de operación, las características geométricas, y los volúmenes actuales y su composición [12].

El pronóstico de los volúmenes de tránsito futuro en *áreas urbanas* aún es mucho más complejo. Según G.F. Newell [13], en el análisis de flujos vehiculares en redes de transporte, la *primera fase* del proceso consiste en un *inventario*, en el año base, de las facilidades de transporte existentes y sus características; de los patrones de viaje determinados a través de encuestas de origen y destino y aforos vehiculares; y de los factores de planeación como usos del suelo, distribución de los ingresos, estructura urbana y tipos de empleo. Igualmente, es necesario obtener información relacionada con el crecimiento de la población, el tamaño de la ciudad y los vehículos registrados.

La *segunda fase* tiene como propósito llevar los datos, recolectados en la primera fase, a *relaciones* o *fórmulas* mediante el desarrollo de *modelos*. El modelo de *generación* de viajes, que relaciona los viajes producidos (orígenes) y atraídos (destinos) con los usos del suelo, la densidad de la población, la distribución del ingreso y el tipo de empleo. El modelo de *distribución* de viajes, que apoyado en fórmulas, describe cómo se distribuyen los viajes entre un origen y varios destinos de acuerdo al grado de atracción de las diferentes zonas. Y el modelo de *asignación* de tránsito, que determina cómo se asignan los viajes entre si sobre las diversas rutas entre cada origen y destino, incluyendo elección de modos.

La *tercera fase* de *pronósticos* o *extrapolaciones*, realiza predicciones sobre el uso futuro del suelo, la población, etc. con base en los desarrollos históricos, estimando la generación y distribución de viajes en el futuro.

La *cuarta fase*, o final, *asigna los viajes pronosticados*, o *futuros*, a las rutas de la red de transporte que incluye nuevas vialidades. Se efectúan *estudios económicos* de costo-beneficio para evaluar las diferentes alternativas orientadas hacia la expansión del sistema vial y de transporte.

Ejemplo 8.6

El croquis de la figura 8.12 ilustra parte de la red vial de cierta región, que une los puntos B, L, P, M y C, en tramos carreteros de dos carriles.

El punto B es un importante puerto marítimo, lugar de transferencia de un alto porcentaje de las importaciones y exportaciones de la región. El punto M es un crucero obligado de paso de los camiones de carga que van y vienen de B desde y hacia el centro, norte y sur de la región. Los camiones con origen y destino el punto B y el sur de la región no circulan por el tramo $C-L$, sino que operan la ruta $C-M-L-B$.

Figura 8.12 Red de influencia de una nueva carretera

En las épocas invernales en el tramo $L-B$ se producen deslizamientos, que en algunos casos han obstruido la carretera hasta por varios días, dejando incomunicados el puerto B y el interior de la región. Estos antecedentes han planteado la necesidad de realizar un estudio sobre la factibilidad de una nueva carretera que operaría como alterna entre los puntos P y B en una longitud aproximada de 65 kilómetros.

Por encuestas de origen y destino previas en el tramo $M-L$, y de acuerdo al movimiento de carga en la red de carreteras, se parte de la premisa de que la nueva carretera será una excelente alternativa para los vehículos que actualmente utilizan la ruta $M-L-B$ en los dos sentidos, más no así para los que circulan por la ruta $C-L-B$. Esto hace pensar que una buena cantidad de los vehículos que circulan por el tramo $M-L$, que incluye todos los camiones de carga hacia y desde B, serán atraídos por la nueva carretera.

Por todo lo anterior y mediante estudios preliminares de las series históricas del $TPDS$ para el tramo $M-L$, se llegó a la siguiente recta de regresión:

$$y = 70.38(x) - 138{,}146$$

Donde:

y = $TPDS$ (vehículos mixtos/día/ambos sentidos)

x = año calendario

Para la futura carretera se han adoptado los siguientes parámetros:

- Año de los estudios preliminares: 2006
- Año de proyecto: 2030
- Tiempo de planeación, estudios, proyecto y construcción: 3 años
- Año de apertura de la nueva carretera: 2010
- Por estudios previos de atracción en el área, se espera que la nueva carretera atraerá el 65% de los volúmenes de tránsito del tramo $M-L$
- Se supone que el crecimiento normal del tránsito de la nueva carretera conservará la misma tasa de crecimiento del tramo $M-L$
- Se espera un tránsito generado del 15% del tránsito actual, y un tránsito desarrollado del 5% del tránsito actual

Se desea realizar un estimativo preliminar del volumen de tránsito futuro para el año 2030 en la carretera alterna y calcular los factores de proyección para los años 2015, 2020, 2025 y 2030.

En la figura 8.13, se ha dibujado la recta del $TPDS$ (y) en función de los años (x) para el tramo $M-L$.

$TPDS$ en el año 2010 para el tramo $M-L$:

$$TPDS_{2010_{ML}} = y = 70.38(x) - 138{,}146$$

$$= 70.38(2010) - 138{,}146$$

$$= 3{,}318 \text{ vehículos mixtos/día/ambos sentidos}$$

Tránsito actual TA, en la nueva carretera en el año de apertura (año 2010), de acuerdo con la ecuación (8.28) es:

$$TA = TE + TAt = 0 + TAt$$

$$= 0.65\left(TPDS_{2010_{ML}}\right) = 0.65(3{,}318)$$

$$= 2{,}157 \text{ vehículos mixtos/día/ambos sentidos}$$

Como el crecimiento normal del tránsito CNT, en la nueva carretera conserva el mismo crecimiento del tramo $M-L$, su función definida por otra recta de igual pendiente, tiene un valor del intercepto b de:

$$y = 70.38(x) - b$$

$$2{,}157 = 70.38(2010) - b$$

$$b = 139{,}307$$

Por lo tanto, el CNT en la nueva carretera, a partir del año 2010, es:

$$CNT = 70.38(x) - 139{,}307 - TA$$

$$= 70.38(x) - 139{,}307 - 2{,}157$$

$$= 70.38(x) - 141{,}464$$

Figura 8.13 *Pronóstico del volumen de tránsito futuro en una carretera alterna*

Obsérvese en la figura 8.13 que el *CNT* para la nueva carretera en el año 2010 es cero, pues:

$$CNT = 70.38(2010) - 141{,}464 = 0$$

Esto es apenas lógico, ya que a partir del año 2010 el tránsito normal empieza a crecer.

Tránsito generado *TG*, y desarrollado *TD*, en la nueva carretera:

$$TG = 0.15(TA)$$

$$= 0.15(2{,}157)$$

$$= 324 \text{ vehículos mixtos/día/ambos sentidos}$$

$$TD = 0.05(TA)$$

$$= 0.05(2{,}157)$$

$$= 108 \text{ vehículos mixtos/día/ambos sentidos}$$

Tránsito futuro TF, en la nueva carretera:

$$TF = TA + CNT + TG + TD$$
$$= 2{,}157 + [70.38(x) - 141{,}464] + 324 + 108$$
$$= 70.38(x) - 138{,}875$$

Tránsito futuro para el año 2030:

$$TF_{2030} = 70.38(2030) - 138{,}875$$
$$= 3{,}996 \text{ vehículos mixtos/día/ambos sentidos}$$

Factores de proyección:

$$FP = \frac{TF}{TA} = \frac{70.38(x) - 138{,}875}{2{,}157}$$

Para valores de x correspondientes a los años 2015, 2020, 2025 y 2030, se tiene:

$$FP_{2015} = 1.36$$

$$FP_{2020} = 1.53$$

$$FP_{2025} = 1.69$$

$$FP_{2030} = 1.85$$

8.5.5 Regresión matemática para el cálculo de volúmenes de tránsito futuro

Para obtener una estimación de los volúmenes de tránsito futuro, sobre todo en carreteras, donde se cuenta con datos de las series históricas de los volúmenes de tránsito promedio diario $TPDS$, se utilizan las regresiones lineales y curvilíneas, tipos línea recta, exponencial, potencial y logarítmica.

1. Regresión lineal simple (línea de mínimos cuadrados)

La figura 8.14 ilustra esquemáticamente los valores observados (reales) de la variable dependiente y_i, y sus correspondientes valores estimados (teóricos) $\hat{y}_i$, para valores específicos de la variable independiente x_i. Esta estimación se realiza a través de la recta de regresión trazada.

Por lo tanto, se puede decir que a cualquier x_i le corresponde un valor observado y_i (real) y un valor estimado $\hat{y}_i$ (teórico).

La ecuación de la recta de regresión es:

$$\hat{y}_i = a + bx_i \tag{8.34}$$

Figura 8.14 Regresión lineal simple

Donde a representa el intercepto sobre el eje vertical y b la pendiente de la línea de regresión. A su vez, a la diferencia entre el valor observado y el valor estimado, se le denomina error δ_i, esto es:

$$\delta_i = y_i - \hat{y}_i$$

El método de los mínimos cuadrados, dice que para n valores observados, la suma de los cuadrados de los errores, alrededor de la línea de regresión debe ser mínima:

$$\sum_{i=1}^{n} \delta_i^2 = Mínimo$$

$$\sum_{i=1}^{n} \delta_i^2 = \sum_{i=1}^{n} (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^{n} (y_i - a - bx_i)^2$$

Entonces se trata de calcular los parámetros a y b para un conjunto de n pares de datos (x_i, y_i). Para un mínimo, la primera derivada parcial debe ser igual a cero, esto es:

$$\frac{\partial}{\partial a}\left[\sum_{i=1}^{n} (y_i - a - bx_i)^2\right] = -2\left[\sum_{i=1}^{n} (y_i - a - bx_i)\right] = 0 \tag{8.35}$$

$$\frac{\partial}{\partial b}\left[\sum_{i=1}^{n} (y_i - a - bx_i)^2\right] = -2\left[\sum_{i=1}^{n} (y_i - a - bx_i)x_i\right] = 0 \tag{8.36}$$

El segundo término de la ecuación (8.35) debe ser igual a cero, esto es:

$$\sum_{i=1}^{n} y_i - \sum_{i=1}^{n} a - b\sum_{i=1}^{n} x_i = 0$$

De donde se obtiene la primera ecuación normal:

$$na + \left(\sum_{i=1}^{n} x_i\right) b = \sum_{i=1}^{n} y_i \tag{8.37}$$

De manera similar, el segundo término de la ecuación (8.36), también debe ser igual a cero, esto es:

$$\sum_{i=1}^{n} x_i y_i - a\sum_{i=1}^{n} x_i - b\sum_{i=1}^{n} x_i^2 = 0$$

De donde se obtiene la segunda ecuación normal:

$$\left(\sum_{i=1}^{n} x_i\right) a + \left(\sum_{i=1}^{n} x_i^2\right) b = \sum_{i=1}^{n} x_i y_i \tag{8.38}$$

Por otra parte, el coeficiente de correlación r, se calcula mediante la siguiente expresión:

$$r = \frac{n\sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{\left[n\sum x_i^2 - \left(\sum x_i\right)^2\right]\left[n\sum y_i^2 - \left(\sum y_i\right)^2\right]}} \tag{8.39}$$

Ejemplo 8.6

En la tabla 8.11, para una carretera de dos carriles, se presentan para diferentes años los volúmenes de tránsito promedio diario *TPDS*, lo mismo que los cálculos necesarios para resolver las ecuaciones normales y así obtener los parámetros a y b que definen la recta de regresión.

Tabla 8.11 Regresión lineal simple

Año	*TPDS* (veh/día)	x_i	y_i	x_i^2	$x_i y_i$	y_i^2
2003	4,731	1	4,731	1	4,731	22,382,361
2004	5,207	2	5,207	4	10,414	27,112,849
2005	5,501	3	5,501	9	16,503	30,261,001
2006	5,605	4	5,605	16	22,420	31,416,025
Sumatorias		$\sum x_i = 10$	$\sum y_i = 21{,}044$	$\sum x_i^2 = 30$	$\sum x_i y_i = 54{,}068$	$\sum y_i^2 = 111{,}172{,}236$

Aplicando los valores de la tabla 8.11 a las ecuaciones normales (8.37) y (8.38), se tiene:

$$4a + 10b = 21{,}044$$

$$10a + 30b = 54{,}068$$

Resolviendo para a y b, se obtiene:

$a = 4{,}532$

$b = 291.6$

Por lo tanto, según la ecuación (8.34), la expresión de la recta de regresión es:

$\hat{y}_i = 4{,}532 + 291.6x_i$

Los valores estimados (teóricos) del *TPDS* para los años 2003, 2004, 2005 y 2006 son:

$x_i = 1 \Rightarrow \hat{y}_{2003} = \hat{y}_1 = 4{,}532 + 291.6(1) = 4{,}823.6 \text{ veh/día}$

$x_i = 2 \Rightarrow \hat{y}_{2004} = \hat{y}_2 = 4{,}532 + 291.6(2) = 5{,}115.2 \text{ veh/día}$

$x_i = 3 \Rightarrow \hat{y}_{2005} = \hat{y}_3 = 4{,}532 + 291.6(3) = 5{,}406.8 \text{ veh/día}$

$x_i = 4 \Rightarrow \hat{y}_{2006} = \hat{y}_4 = 4{,}532 + 291.6(4) = 5{,}698.4 \text{ veh/día}$

El pronóstico del *TPDS* para el año 2010 será:

$x_i = 8 \Rightarrow \hat{y}_{2010} = \hat{y}_8 = 4{,}532 + 291.6(8) = 6{,}864.8 \text{ veh/día}$

En la figura 8.15 se presentan gráficamente, para los diferentes años, los valores del *TPDS* observados y estimados a través de la recta de regresión.

El coeficiente de correlación, de acuerdo a la ecuación (8.39), es:

$$r = \frac{4(54{,}068) - 10(21{,}044)}{\sqrt{\left[4(30) - (10)^2\right]\left[4(111{,}172{,}236) - (21{,}044)^2\right]}} = 0.96$$

2. *Regresión curvilínea tipo exponencial*

La parte superior de la figura 8.16 ilustra esquemáticamente los valores observados (reales) de la variable dependiente y_i, y sus correspondientes valores estimados (teóricos) $\hat{y}_i$, para valores específicos de la variable independiente x_i, de acuerdo a una curva de tipo exponencial.

Para cualquier x_i existe un valor observado y_i (real), el cual es estimado a través de $\hat{y}_i$ (teórico), mediante la siguiente función exponencial:

$$\hat{y}_i = ab^{x_i} \tag{8.40}$$

Donde a y b representan los parámetros a determinar, para así definir la curva de regresión.

Sacando logaritmos a la ecuación (8.40), se tiene:

$\ln \hat{y}_i = \ln a + x_i \ln b$

Figura 8.15 Regresión lineal simple, ejemplo 8.6

De donde, de acuerdo con la parte inferior de la figura 8.16, se puede realizar la siguiente transformación:

$$ln\, y = y'$$

$$ln\, \hat{y}_i = \hat{y}'_i$$

$$ln\, a = a'$$

$$ln\, b = b'$$

De tal manera que:

$$\hat{y}'_i = a' + b' x_i$$

Se trata de estimar los valores de a' y b', para obtener los parámetros a y b, aplicados en la ecuación transformada de la recta.

Tal como se determinó en la regresión lineal simple, aquí también se cumple que para n valores observados, la suma de los cuadrados de los errores, alrededor de la línea de regresión debe ser mínima:

$$\sum_{i=1}^{n} \delta'^2_i = Mínimo$$

Figura 8.16 *Regresión curvilínea tipo exponencial*

$$\sum_{i=1}^{n}\delta'^2_i=\sum_{i=1}^{n}(y'_i-\hat{y}'_i)^2=\sum_{i=1}^{n}(y'_i-a'-b'x_i)^2$$

Una vez realizada la derivación parcial, se obtiene:

$$na'+(\sum x_i)b'=\sum y'_i$$

$$(\sum x_i)a'+(\sum x_i^2)b'=\sum x_i y'_i$$

De donde se obtienen las ecuaciones normales:

$$n(\ln a)+(\sum x_i)(\ln b)=\sum \ln y_i \qquad (8.41)$$

$$\left(\sum x_i\right)(\ln a)+\left(\sum x_i^2\right)(\ln b)=\sum x_i(\ln y_i) \tag{8.42}$$

El coeficiente de correlación r, se calcula mediante la siguiente expresión:

$$r=\frac{n\left[\sum x_i(\ln y_i)\right]-\left(\sum x_i\right)\left(\sum \ln y_i\right)}{\sqrt{\left[n\sum x_i^2-\left(\sum x_i\right)^2\right]\left[n\sum(\ln y_i)^2-\left(\sum \ln y_i\right)^2\right]}} \tag{8.43}$$

Ejemplo 8.7

En la tabla 8.12, para los mismos volúmenes de tránsito promedio diario *TPDS* del ejemplo anterior, se presentan los cálculos necesarios para resolver las ecuaciones normales y así obtener los parámetros a y b que definen la curva exponencial de regresión.

Tabla 8.12 Regresión curvilínea tipo exponencial

Año	*TPDS* (veh/día)	x_i	y_i	x_i^2	$\ln y_i$	$x_i(\ln y_i)$	$(\ln y_i)^2$
2003	4,731	1	4,731	1	8.462	8.462	71.605
2004	5,207	2	5,207	4	8.558	17.116	73.239
2005	5,501	3	5,501	9	8.613	25.839	74.184
2006	5,605	4	5,605	16	8.631	34.524	74.494
Sumatorias		$\sum x_i = 10$		$\sum x_i^2 = 30$	$\sum \ln y_i = 34.2644$	$\sum x_i(\ln y_i) = 85.941$	$\sum(\ln y_i)^2 = 293.522$

Aplicando los valores de la tabla 8.12 a las ecuaciones normales (8.41) y (8.42), se tiene:

$$4(\ln a)+10(\ln b)=34.264$$

$$10(\ln a)+30(\ln b)=85.941$$

Resolviendo para a y b, se obtiene:

$$a=4{,}562$$

$$b=1.0578$$

Por lo tanto, según la ecuación (8.40), la expresión de la curva de regresión exponencial es:

$$\hat{y}_i=4{,}562\left(1.0578^{x_i}\right)$$

Los valores estimados (teóricos) del *TPDS* para los años 2003, 2004, 2005 y 2006 son:

$$x_i=1 \Rightarrow \hat{y}_{2003}=\hat{y}_1=4{,}562(1.0578)^1=4{,}562.0 \text{ veh/día}$$

$$x_i=2 \Rightarrow \hat{y}_{2004}=\hat{y}_2=4{,}562(1.0578)^2=5{,}104.6 \text{ veh/día}$$

$$x_i = 3 \Rightarrow \hat{y}_{2005} = \hat{y}_3 = 4{,}562(1.0578)^3 = 5{,}399.7 \text{ veh/día}$$

$$x_i = 4 \Rightarrow \hat{y}_{2006} = \hat{y}_4 = 4{,}562(1.0578)^4 = 5{,}711.8 \text{ veh/día}$$

El pronóstico del *TPDS* para el año 2010 será:

$$x_i = 8 \Rightarrow \hat{y}_{2010} = \hat{y}_8 = 4{,}562(1.0578)^8 = 7{,}151.3 \text{ veh/día}$$

Este pronóstico comparado con el arrojado por la regresión rectilínea, es mayor ($7{,}151.3 \text{ veh/día} > 6{,}864.8 \text{ veh/día}$).

En la figura 8.17 se presentan gráficamente, para los diferentes años, los valores del *TPDS* observados y estimados a través de la curva exponencial de regresión.

Figura 8.17 *Regresión curvilínea tipo exponencial, ejemplo 8.7*

El coeficiente de correlación, de acuerdo a la ecuación (8.43), es:

$$r = \frac{4(85.941) - 10(34.264)}{\sqrt{\left[4(30) - (10)^2\right]\left[4(293.522) - (34.264)^2\right]}} = 0.98$$

3. *Regresión curvilínea tipo potencial*

Siguiendo el mismo procedimiento de los dos casos anteriores, para cualquier x_i existe un valor observado y_i (real), el cual es estimado a través de $\hat{y}_i$ (teórico), mediante la siguiente función potencial:

$$\hat{y}_i = a x_i^b \tag{8.44}$$

Sacando logaritmos, se tiene:

$$ln\, \hat{y}_i = ln\, a + b\, ln\, x_i$$

De donde, se puede realizar la siguiente transformación:

$$ln\, \hat{y}_i = \hat{y}'_i$$

$$ln\, a = a'$$

$$ln\, x_i = x'_i$$

De tal manera que:

$$\hat{y}'_i = a' + b x'_i$$

Realizada la derivación parcial que hace que la suma de los cuadrados de los errores, alrededor de la línea de regresión sea mínima, se obtiene:

$$na' + \left(\sum x'_i\right) b = \sum y'_i$$

$$\left(\sum x'_i\right) a' + \left(\sum x'^2_i\right) b = \sum x'_i\, y'_i$$

De donde se obtienen las ecuaciones normales:

$$n\,(ln\, a) + \left(\sum ln\, x_i\right) b = \sum ln\, y_i \tag{8.45}$$

$$\left(\sum ln\, x_i\right)(ln\, a) + \left[\sum (ln\, x_i)^2\right] b = \sum (ln\, x_i)(ln\, y_i) \tag{8.46}$$

El coeficiente de correlación *r*, se calcula mediante la siguiente expresión:

$$r = \frac{n\left[\sum (ln\, x_i)(ln\, y_i)\right] - \left(\sum ln\, x_i\right)\left(\sum ln\, y_i\right)}{\sqrt{\left[n\sum (ln\, x_i)^2 - \left(\sum ln\, x_i\right)^2\right]\left[n\sum (ln\, y_i)^2 - \left(\sum ln\, y_i\right)^2\right]}} \tag{8.47}$$

Ejemplo 8.8

Utilizando los mismos datos del *TPDS* de los ejemplos anteriores, en la tabla 8.13, se presentan los cálculos necesarios para resolver las ecuaciones normales y así obtener los parámetros *a* y *b* que definen la curva potencial de regresión.

Aplicando los valores de la tabla 8.13 a las ecuaciones normales (8.45) y (8.46), se tiene:

$$4\,(ln\, a) + 3.1780(b) = 34.2638$$

$$3.1780(ln\, a) + 3.6091(b) = 27.3603$$

Tabla 8.13 Regresión curvilínea tipo potencial

Año	TPDS (veh/día)	x_i	y_i	$\ln x_i$	$\ln y_i$	$(\ln x_i)^2$	$(\ln y_i)^2$	$(\ln x_i)(\ln y_i)$
2003	4,731	1	4,731	0.0000	8.4619	0.0000	71.6038	0.0000
2004	5,207	2	5,207	0.6931	8.5578	0.4804	73.2359	5.9314
2005	5,501	3	5,501	1.0986	8.6127	1.2069	74.1786	9.4619
2006	5,605	4	5,605	1.3863	8.6314	1.9218	74.5011	11.9657
Sumatorias				$\sum \ln x_i = 3.1780$	$\sum \ln y_i = 34.2638$	$\sum (\ln x_i)^2 = 3.6091$	$\sum (\ln y_i)^2 = 293.5194$	$\sum (\ln x_i)(\ln y_i) = 27.3603$

Resolviendo para a y b, se obtiene:

$a = 4{,}746$

$b = 0.127$

Por lo tanto, según la ecuación (8.44), la expresión de la curva de regresión potencial es:

$$\hat{y}_i = 4{,}746 x_i^{0.127}$$

Los valores estimados (teóricos) del *TPDS* para los años 2003, 2004, 2005 y 2006 son:

$$x_i = 1 \Rightarrow \hat{y}_{2003} = \hat{y}_1 = 4{,}746(1)^{0.127} = 4{,}746.0 \text{ veh/día}$$

$$x_i = 2 \Rightarrow \hat{y}_{2004} = \hat{y}_2 = 4{,}746(2)^{0.127} = 5{,}182.7 \text{ veh/día}$$

$$x_i = 3 \Rightarrow \hat{y}_{2005} = \hat{y}_3 = 4{,}746(3)^{0.127} = 5{,}456.6 \text{ veh/día}$$

$$x_i = 4 \Rightarrow \hat{y}_{2006} = \hat{y}_4 = 4{,}746(4)^{0.127} = 5{,}659.6 \text{ veh/día}$$

El pronóstico del *TPDS* para el año 2010 será:

$$x_i = 8 \Rightarrow \hat{y}_{2010} = \hat{y}_8 = 4{,}746(8)^{0.127} = 6{,}180.5 \text{ veh/día}$$

En la figura 8.18 se presentan gráficamente, para los diferentes años, los valores del *TPDS* observados y estimados a través de la curva potencial de regresión.

El coeficiente de correlación, de acuerdo a la ecuación (8.47), es:

$$r = \frac{4(27.3603) - 3.1780(34.2638)}{\sqrt{\left[4(3.6091) - (3.1780)^2\right]\left[4(293.5194) - (34.2638)^2\right]}} = 1.00$$

Figura 8.18 Regresión curvilínea tipo potencial, ejemplo 8.8

4. *Regresión curvilínea tipo logarítmica*

Para cualquier x_i existe un valor observado y_i (real), el cual es estimado a través de $\hat{y}_i$ (teórico), mediante la siguiente función logarítmica:

$$\hat{y}_i = a + b \ln x_i \tag{8.48}$$

De donde, se puede realizar la siguiente transformación:

$$\ln x_i = x'_i$$

De tal manera que:

$$\hat{y}_i = a + bx'_i$$

De igual manera, que en todos los casos anteriores, realizada la derivación parcial que hace que la suma de los cuadrados de los errores, alrededor de la línea de regresión sea mínima, se obtiene:

$$na + \left(\sum x'_i\right)b = \sum y_i$$

$$\left(\sum x'_i\right)a + \left(\sum x'^2_i\right)b = \sum x'_i\, y_i$$

De donde se obtienen las ecuaciones normales:

$$n\,a+(\sum ln\,x_i)b=\sum y_i \tag{8.49}$$

$$(\sum ln\,x_i)(a)+[\sum(ln\,x_i)^2]b=\sum(ln\,x_i)(y_i) \tag{8.50}$$

El coeficiente de correlación r, se calcula mediante la siguiente expresión:

$$r=\frac{n[\sum(ln\,x_i)(y_i)]-(\sum ln\,x_i)(\sum y_i)}{\sqrt{[n\sum(ln\,x_i)^2-(\sum ln\,x_i)^2][n\sum(y_i)^2-(\sum y_i)^2]}} \tag{8.51}$$

Ejemplo 8.9

Siguiendo con los mismos datos del *TPDS* de los ejemplos anteriores, en la tabla 8.14, se presentan los cálculos necesarios para resolver las ecuaciones normales y así obtener los parámetros a y b que definen la curva logarítmica de regresión.

Tabla 8.14 Regresión curvilínea tipo logarítmica

Año	*TPDS* (veh/día)	x_i	y_i	$ln\,x_i$	$(ln\,x_i)^2$	$(y_i)^2$	$(ln\,x_i)y_i$
2003	4,731	1	4,731	0.0000	0.0000	22,382,361	0.0000
2004	5,207	2	5,207	0.6931	0.4804	27,112,849	3,608.9717
2005	5,501	3	5,501	1.0986	1.2069	30,261,001	6,043.3986
2006	5,605	4	5,605	1.3863	1.9218	31,416,025	7,770.2115
Sumatorias			$\sum y_i$ = 21,044	$\sum ln\,x_i$ = 3.1780	$\sum(ln\,x_i)^2$ = 3.6091	$\sum(ln\,y_i)^2$ = 111,172,236	$\sum(ln\,x_i)(ln\,y_i)$ = 17,422.5818

Aplicando los valores de la tabla 8.14 a las ecuaciones normales (8.49) y (8.50), se tiene:

$$4a+3.1780(b)=21{,}044$$

$$3.1780(a)+3.6091(b)=17{,}422.5818$$

Resolviendo para a y b, se obtiene:

$$a=4{,}746$$

$$b=648.53$$

Por lo tanto, según la ecuación (8.48), la expresión de la curva de regresión logarítmica es:

$$\hat{y}_i=4{,}746+648.53(ln\,x_i)$$

Los valores estimados (teóricos) del *TPDS* para los años 2003, 2004, 2005 y 2006 son:

$$x_i = 1 \Rightarrow \hat{y}_{2003} = \hat{y}_1 = 4{,}746 + 648.53(\ln 1) = 4{,}746.0 \text{ veh/día}$$

$$x_i = 2 \Rightarrow \hat{y}_{2004} = \hat{y}_2 = 4{,}746 + 648.53(\ln 2) = 5{,}195.5 \text{ veh/día}$$

$$x_i = 3 \Rightarrow \hat{y}_{2005} = \hat{y}_3 = 4{,}746 + 648.53(\ln 3) = 5{,}458.5 \text{ veh/día}$$

$$x_i = 4 \Rightarrow \hat{y}_{2006} = \hat{y}_4 = 4{,}746 + 648.53(\ln 4) = 5{,}645.1 \text{ veh/día}$$

El pronóstico del *TPDS* para el año 2010 será:

$$x_i = 8 \Rightarrow \hat{y}_{2010} = \hat{y}_8 = 4{,}746 + 648.53(\ln 8) = 6{,}094.6 \text{ veh/día}$$

En la figura 8.19 se presentan gráficamente, para los diferentes años, los valores del *TPDS* observados y estimados a través de la curva logarítmica de regresión.

Figura 8.19 *Regresión curvilínea tipo logarítmica, ejemplo 8.9*

El coeficiente de correlación, de acuerdo a la ecuación (8.51), es:

$$r = \frac{4(17{,}422.5818) - 3.1780(21{,}044)}{\sqrt{\left[4(3.6091) - (3.1780)^2\right]\left[4(111{,}172{,}236) - (21{,}044)^2\right]}} = 0.99$$

A manera de comparación, se presentan a continuación el pronóstico de los volúmenes de tránsito promedio diario semanal *TPDS* para el año 2010, arrojados para cada una de las regresiones:

Regresión lineal: $\hat{y}_{2010} = 6{,}864.8$ *veh/día*
Regresión exponencial: $\hat{y}_{2010} = 7{,}151.3$ *veh/día*
Regresión potencial: $\hat{y}_{2010} = 6{,}180.5$ *veh/día*
Regresión logarítmica: $\hat{y}_{2010} = 6{,}094.6$ *veh/día*

Independientemente del grado de correlación, se puede concluir que los pronósticos mediante la regresión exponencial, con el transcurrir de los años, tienden a ser más elevados, que en cualquiera de las demás regresiones. Por el contrario, los pronósticos mediante las regresiones potencial y logarítmica, tienden a ser más bajos. En la práctica, se ha comprobado que los volúmenes de tránsito futuro, no tienden a ser tan altos y tampoco tienden a ser tan bajos, por lo que la regresión lineal es la que más se ajusta a su tendencia de crecimiento.

8.6 Estudio de volúmenes de tránsito

Los estudios sobre volúmenes de tránsito se realizan con el propósito de obtener datos reales relacionados con el movimiento de vehículos y/o personas, sobre puntos o secciones específicas dentro de un sistema vial de carreteras o calles. Dichos datos se expresan con relación al tiempo, y de su conocimiento se hace posible el desarrollo de metodologías que permiten estimar de manera razonable, la calidad del servicio que el sistema presta a los usuarios.

Estos estudios varían desde los muy amplios en toda una red o sistema vial, hasta los muy sencillos en lugares específicos tales como en intersecciones aisladas, puentes, casetas de cobro, túneles, etc. Las razones para llevar a cabo los estudios de volúmenes de tránsito son tan variadas como los lugares mismos donde se realizan.

El tipo de datos recolectados en un estudio de volúmenes de tránsito depende mucho de la aplicación que se le vaya dar a los mismos. Así por ejemplo, algunos estudios requieren detalles como la composición vehicular y los movimientos direccionales, mientras que otros sólo exigen conocer los volúmenes totales. También, en algunos casos es necesario aforar vehículos únicamente durante períodos cortos de una hora o menos, otras veces el período puede ser de un día, una semana o un mes e inclusive un año.

Existen diversas formas para obtener los recuentos de volúmenes de tránsito, para lo cual se ha generalizado el uso de aparatos de medición de diversa índole. Estas formas incluyen: los aforos manuales a cargo de personas, los cuales son particularmente útiles para conocer el volumen de los movimientos direccionales en intersecciones, los volúmenes por carriles individuales y la composición vehicular. Los aforos por combinación de métodos manuales y mecánicos, tales como el uso de contadores mecánicos accionados manualmente por observadores. Los aforos con el uso de dispositivos mecánicos, los cuales automáticamente contabilizan y registran los ejes de los vehículos. Y los aforos con la utilización de técnicas tan sofisticadas como las cámaras fotográficas, las filmaciones y los equipos electrónicos adaptados a computadoras. Las fotografías de la figura 8.20 ilustran las técnicas manuales y automáticas de aforos vehiculares.

El capítulo 3 del Manual de Estudios de Ingeniería de Tránsito [10], en forma detallada presenta una guía básica para llevar a cabo diferentes tipos de estudio de volúmenes de tránsito.

Figura 8.20 Técnicas manuales y automáticas de aforos vehiculares

8.7 Problemas propuestos

8.1 Para un mismo punto sobre una vialidad, entre las 07:00 y las 08:30 horas, se realizaron dos aforos en días diferentes. Los volúmenes en vehículos mixtos registrados en períodos de 5 minutos se presentan en la tabla 8.15.

Tabla 8.15 Variación del volumen de tránsito en períodos de máxima demanda, problema 8.1

Período	Vehículos mixtos/5 minutos																	
	7:00 7:05	7:05 7:10	7:10 7:15	7:15 7:20	7:20 7:25	7:25 7:30	7:30 7:35	7:35 7:40	7:40 7:45	7:45 7:50	7:50 7:55	7:55 8:00	8:00 8:05	8:05 8:10	8:10 8:15	8:15 8:20	8:20 8:25	8:25 8:30
Día 1	81	58	58	122	97	83	114	78	78	78	63	93	112	89	51	28	28	55
Día 2	50	50	42	27	63	63	63	49	49	38	38	38	38	123	160	102	74	25

1) Dibuje los histogramas que muestren la variación del volumen en períodos de 5 y 15 minutos. 2) Calcule el *FHMD* para cada día considerando los períodos de 5 y 15 minutos respectivamente. 3) Compare las dos situaciones y comente sus resultados.

8.2 La tabla 8.16 muestra el patrón de variación del volumen de tránsito en períodos máximos, durante tres días diferentes, para una misma sección de una determinada vialidad. 1) Dibuje los histogramas de la variación del volumen de tránsito en cada día. 2) Calcule el *FHMD* para cada día. 3) Comente cómo es el flujo de tránsito para cada día, independientemente el uno del otro. 4) Compare los tres patrones y concluya.

Tabla 8.16 Variación del volumen de tránsito en horas de máxima demanda, problema 8.2

Período	Vehículos mixtos/5 minutos							
	7:00 7:15	7:15 7:30	7:30 7:45	7:45 8:00	8:00 8:15	8:15 8:30	8:30 8:45	8:45 9:00
Día 1	105	105	392	506	598	304	198	106
Día 2	98	402	402	503	406	107	610	100
Día 3	405	405	405	405	496	496	405	297

8.3 Los datos de la tabla 8.17 pertenecen a la hora de máxima demanda de una intersección. 1) Calcule *FHMD* para toda la intersección. 2) Calcule el *FHMD* para cada acceso. 3) ¿Cuál sería un valor adecuado de análisis?

Tabla 8.17 Variación del volumen de tránsito en horas de máxima demanda en una intersección, problema 8.3

Período	Vehículos mixtos/15 minutos				
	Acceso				Total en la intersección
	Norte	Sur	Este	Oeste	
8:00-8:15	217	228	42	152	639
8:15-8:30	146	257	41	131	575
8:30-8:45	118	174	48	159	499
8:45-9:00	134	253	51	154	592

8.4 Una estación de aforo para una carretera de dos carriles reporta los volúmenes de tránsito diario, en vehículos mixtos en ambos sentidos, dados en la tabla 8.18, con una composición vehicular de: 61% automóviles, 7% autobuses y 32% camiones.

Tabla 8.18 Variación del volumen de tránsito diario en una semana, problema 8.4

Día	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
Tránsito Diario (veh/día)	4,055	4,317	3,928	4,430	4,052	4,255	4,209

A su vez el total de camiones aforados durante toda la semana fue de 7,928, distribuidos así:

Camiones pequeños de 2 ejes:	2,109
Camiones grandes de 2 ejes:	3,564
Camiones de 3 y 4 ejes:	568
Camiones de 5 ejes:	317
Camiones de 6 o más ejes:	1,370

De igual manera, la distribución horaria de volúmenes para el día jueves, desde las 00:00 horas hasta las 24:00 horas, fue:

30, 47, 62, 73, 98, 155, 278, 308, 329, 281, 260, 293, 263, 215, 264, 257, 217, 273, 246, 157, 131, 82, 56, 55

1) Calcule el tránsito promedio diario semanal. 2) Calcule el tránsito promedio diario semanal de cada tipo de camión. 3) Dibuje el histograma de la variación horaria del día jueves y calcule la relación (o por ciento) de cada volumen horario con respecto al diario.

8.5 Para un volumen horario de máxima demanda de 800 vehículos, dibuje una gráfica que muestre la tasa de flujo máxima dentro de la hora, para valores del *FHMD* de 1.00 a 0.75.

8.6 En una sección transversal de una carretera rural de dos carriles, se realizó un aforo vehicular en períodos de 15 minutos las 24 horas del día durante dos semanas consecutivas (14 días). En la tabla 8.19 se resumen los volúmenes de tránsito en vehículos mixtos por hora.

1) Para cada semana calcule los intervalos del *TPDA* en función del *TPDS* para los niveles de confiabilidad del 90% y 95%, ¿cuál es su interpretación? 2) Organice los volúmenes horarios de mayor a menor durante las dos semanas (son 336 volúmenes horarios) y expréselos como un porcentaje del tránsito promedio diario quincenal (*TPDQ*). De esta manera dibuje una gráfica de los volúmenes horarios como % del *TPDQ* en función de las horas de las dos semanas y realice el ajuste por regresión matemática, ¿cuál es su correlación? 3) Con base en las dos situaciones anteriores, ¿cuál sería un valor adecuado

Tabla 8.19 Variación horaria y diaria de los volúmenes de tránsito, problema 8.6

Hora del día	Vehículos mixtos/hora/ambos sentidos													
	Semana 1							Semana 2						
	Lun	Mar	Miér	Juev	Vier	Sáb	Dom	Lun	Mar	Miér	Juev	Vier	Sáb	Dom
00-01	62	57	42	49	48	44	34	59	48	63	35	47	65	28
01-02	53	49	36	42	41	37	29	50	45	59	38	51	63	32
02-03	47	43	32	38	37	33	26	45	62	47	50	38	47	39
03-04	61	56	41	49	48	43	33	67	65	58	57	45	52	40
04-05	97	89	66	77	76	69	53	102	94	85	79	69	87	68
05-06	149	137	101	119	116	105	82	169	129	141	162	138	129	93
06-07	223	204	152	178	174	157	122	241	210	168	171	163	171	140
07-08	337	309	229	269	263	238	185	328	320	221	260	254	230	179
08-09	314	292	297	286	291	261	287	325	282	288	277	281	253	278
09-10	274	322	266	273	216	259	308	294	420	346	355	281	337	350
10-11	272	247	281	284	302	331	326	271	227	259	261	278	305	300
11-12	280	287	290	331	288	340	297	269	261	264	301	262	309	270
12-13	324	331	341	272	314	392	391	310	298	307	245	283	353	352
13-14	256	261	256	306	317	324	358	270	257	252	301	312	319	352
14-15	328	338	319	365	333	303	324	315	344	325	372	339	308	330
15-16	311	336	369	376	357	323	311	321	318	349	356	338	306	294
16-17	326	325	287	307	389	303	438	347	317	280	299	379	295	427
17-18	400	348	306	340	328	446	428	398	410	361	401	387	526	505
18-19	394	338	329	394	345	423	415	392	301	293	351	307	376	369
19-20	322	276	269	320	282	346	339	310	250	270	325	304	330	320
20-21	264	227	220	260	231	283	278	270	210	215	272	262	290	285
21-22	182	156	152	187	159	195	192	162	162	132	175	182	192	190
22-23	94	81	78	93	82	101	99	86	87	85	95	94	99	85
23-24	83	71	69	81	73	89	87	72	69	82	69	65	87	86

a tomar en cuenta inicialmente como volumen horario de proyecto? 4) Dibuje un histograma de la distribución de los volúmenes diarios en las dos semanas. 5) Dibuje un histograma de la distribución de los volúmenes horarios para el día sábado de la segunda semana. 6) El volumen horario de máxima demanda se presenta el día sábado de la segunda semana entre las 17:00 y las 18:00 horas con 526 vehículos mixtos por hora en ambos sentidos, distribuidos en períodos de 5 minutos así: 30, 36, 40, 42, 48, 50, 52, 58, 56, 44, 38, 32. Dibuje los histogramas de la distribución de volúmenes en la hora, en períodos de 5 y 15 minutos, y calcule los *FHMD* respectivos. 7) Realice un análisis comparativo de los resultados de los numerales 4), 5) y 6) que le permita caracterizar este flujo de tránsito. ¿Qué consistencia existe entre el uno y los otros?

8.7 Con los datos dados anteriormente en la tabla 8.1 del ejemplo 8.1, dibuje la variación mensual de los volúmenes de tránsito y calcule los factores de ajuste mensual.

8.8 Una determinada carretera el año 1999 tenía un *TPDA* de 1,500 vehículos/día y en el año 2005 un *TPDA* de 2,500 vehículos/día. Suponiendo un comportamiento linealmente constante durante este período y utilizando esta característica para pronosticar volúmenes de tránsito futuro, ¿cuál es la capacidad de la carretera si al 80% de ella se llega en el año 2017?

8.9 Para una corriente vehicular se pronostica el *TPDA* en función de los años, según:

$$y = 167(x) + 1{,}332$$

Donde y es el *TPDA* (veh/día) y x son los años ($x = 0$ para diciembre 2004). Si el final del período de diseño se toma cuando la relación volumen a capacidad es de 0.80, ¿en qué fecha se alcanzaría el final del período de diseño?

8.10 A una carretera en enero del año 2007 se le estima un volumen de 2,000 vehículos/día. Esta carretera se mejorará y rehabilitará, para lo cual se supone un tiempo de reconstrucción de 2 años (los años 2007 y 2008). Esto es, en enero del año 2009 se pondrá completamente al servicio, con lo que se espera una atracción de 500 vehículos/día de otra carretera. De igual manera, se calcula que el crecimiento normal del tránsito es de tipo exponencial, de la forma:

$$Q_f = Q_o(1 + r)^n$$

Donde Q_f es el volumen de tránsito final, Q_o el volumen de tránsito inicial, r la tasa de crecimiento anual (estimada en 5%) y n el número de años. Si el período de diseño es de 8 años, ¿cuál es el volumen de tránsito al final del período de diseño y qué año es?

8.11 Una determinada carretera enero del año 2003 presentaba un volumen de 4,000 vehículos/día y en enero del año 2005 un volumen de 4,500 vehículos/día. Si estos volúmenes tienen una tendencia exponencial: 1) ¿En qué fecha se llega ala capacidad si ésta es de 8,000 vehículos/día? 2) ¿Cuál es la tasa anual del crecimiento del tránsito?

Referencias bibliográficas

[1] Roess, Roger P.; Prassas, Elena S. and Mcshane, William R. *Traffic Engineering*. Third edition, Pearson Prentice Hall, New Jersey, 2004.

[2] Roess, Roger P.; Prassas, Elena S. and Mcshane, William R. *Traffic Engineering*. Second edition, Pearson Prentice Hall, New Jersey, 1998.

[3] Mulinazzi, Thomas E. and Carter, Everett C. *Study of Statewide Traffic Volume Counting Systems for Maryland and West Virginia*. Research Report, Transportation Studies Center and Department of Civil Engineering, University of Maryland, State Highway Administration, 1977.

[4] Homburger, Wolfgang S.; Hall, Jerome W.; Sullivan, Edward C. and Reilly, William R. *Fundamentals of Traffic Engineering*. 15th edition, Institute of Transportation Studies, University of California at Berkeley, California, 2000.

[5] Cal y Mayor y Asociados, S.C. *Concesión para Operar, Conservar y Mantener el Tramo Carretero Libre de Peaje Querétaro-Irapuato*. Querétaro, México, 2005.

[6] Cal y Mayor y Asociados, S.C. *Plan Sectorial de Movilidad en Chihuahua*. México, 2005.

[7] Cal y Mayor y Asociados, S.C. *Aforos e Ingresos de la Autopista Atlixco-Jantetelco*. Puebla, México, 2004.

[8] Secretaría de Comunicaciones y Transportes. *Manual de Proyecto Geométrico de Carreteras*. Primera edición, Cuarta reimpresión, México, 1991.

[9] Pérez, Jaime E. *Probabilidad y Estadística: con Aplicación al Tránsito y las Vías*. Facultad de ingeniería, Universidad del Valle, Santiago de Cali, 1999.

[10] Box, Paul C. and Oppenlander, Joseph C. *Manual de Estudios de Ingeniería de Tránsito*, Traducción del *"Manual of Traffic Engineering Studies"*. Cuarta edición, 1976, Institute of Transportation Engineers, Inc., Co-editores: Coordinación General de Transporte, D.D.F., Asociación Mexicana de Ingeniería de Transportes, A.C., Representaciones y Servicios de Ingeniería, S.A., México, 1985.

[11] Instituto Nacional de Vías. *Manual de Diseño Geométrico para Carreteras*. Ministerio de Transporte, Bogotá, 1998.

[12] Cal y Mayor y Asociados, S.C. *Estudio de Asignación de Tránsito al Libramiento de Tulancingo Hidalgo*. México, 1993.

[13] Newell Gordon F. *Traffic Flow on Transportation Networks*. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, USA and London, England, 1980.

10

Análisis del flujo vehicular

10.1 Generalidades

Mediante el análisis de los *elementos del flujo vehicular* se pueden entender las características y el comportamiento del tránsito, requisitos básicos para el planeamiento, proyecto y operación de carreteras, calles y sus obras complementarias dentro del sistema de transporte. Con la aplicación de las leyes de la física y las matemáticas [1], el *análisis del flujo vehicular* describe la forma como circulan los vehículos en cualquier tipo de vialidad, lo cual permite determinar el nivel eficiencia de la operación.

Uno de los resultados más útiles del análisis del flujo vehicular es el desarrollo de modelos microscópicos y macroscópicos que relacionan sus diferentes variables como el volumen, la velocidad, la densidad, el intervalo y el espaciamiento. Estos modelos han sido la base del desarrollo del concepto de capacidad y niveles de servicio aplicado a diferentes tipos de elementos viales.

El objetivo, al abordar el análisis del flujo vehicular, es dar a conocer algunas de las metodologías e investigaciones y sus aplicaciones más relevantes en este tema, con particular énfasis en los aspectos que relacionan las variables del flujo vehicular, la descripción probabilística o casual del flujo de tránsito, la distribución de los vehículos en una vialidad y las distribuciones estadísticas empleadas en proyecto y control del tránsito.

10.2 Conceptos fundamentales

En esta sección se presenta una descripción de algunas de las características fundamentales del flujo vehicular, representadas en sus tres *variables principales:* el *flujo*, la *velocidad* y la *densidad*. Mediante la deducción de relaciones entre ellas, se puede determinar las características de la corriente de tránsito, y así predecir las consecuencias de diferentes opciones de operación o de proyecto. De igual manera, el conocimiento de estas tres variables reviste singular importancia, ya que éstas indican la calidad o nivel de servicio experimentado por los usuarios de cualquier sistema vial. A su vez, estas tres variables pueden ser expresadas en términos de otras, llamadas *variables asociadas*: el *volumen*, el *intervalo*, el *espaciamiento*, la *distancia* y el *tiempo*.

A continuación se verán los principales conceptos relacionados con las variables del flujo vehicular.

10.2.1 Variables relacionadas con el flujo

Las variables relacionadas con el flujo son la *tasa de flujo*, el *volumen*, el *intervalo simple* entre vehículos consecutivos y el *intervalo promedio* entre varios vehículos.

1. *Tasa de flujo o flujo* (q) *y volumen* (Q)

La *tasa de flujo*, q, es la frecuencia a la cual pasan los vehículos por un punto o sección transversal de un carril o calzada. La tasa de flujo es pues, el número de vehículos, N, que pasan durante un intervalo de tiempo específico, T, inferior a una hora, expresada en vehículos por minuto (veh/min) o vehículos por segundo (veh/s). No obstante, la tasa de flujo, q, también puede ser expresada en vehículos por hora (veh/h), teniendo cuidado de su interpretación, pues no se trata del número de vehículos que efectivamente pasan durante una hora completa o *volumen* horario, Q. La tasa de flujo, q, se calcula entonces con la siguiente expresión:

$$q = \frac{N}{T} \tag{10.1}$$

2. *Intervalo simple* (h_i)

Es el intervalo de tiempo entre el paso de dos vehículos consecutivos, generalmente expresado en segundos y medido entre puntos homólogos del par de vehículos.

3. *Intervalo promedio* ($\bar{h}$)

Es el promedio de todos los intervalos simples, h_i, existentes entre los diversos vehículos que circulan por una vialidad. Por tratarse de un promedio se expresa en segundos por vehículo (s/veh) y se calcula, de acuerdo a la figura 10.1, mediante la siguiente expresión:

$$\bar{h} = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} h_i}{N-1} \tag{10.2}$$

Donde:

$\bar{h}$ = intervalo promedio (s/veh)
N = número de vehículos (veh)
$N-1$ = número de intervalos (veh)
h_i = intervalo simple entre el vehículo i y el vehículo $i+1$

Figura 10.1 *Intervalos entre vehículos*

Obsérvese que las unidades del *intervalo promedio* $\bar{h}$ (s/veh) son las unidades inversas de la *tasa de flujo* q (veh/s), por lo que también puede plantearse la siguiente relación:

$$\bar{h} = \frac{1}{q} \tag{10.3}$$

Ejemplo 10.1

Sobre un punto específico de una vialidad se realizó un aforo vehicular durante una hora en períodos de 15 minutos, dando como resultado el número de vehículos que se muestran en la tabla 10.1. Se desea calcular las tasas de flujo para cada período, calcular el volumen horario y comparar la tasa de flujo máximo y el volumen horario.

Tabla 10.1 Volúmenes en 15 minutos

Intervalo de tiempo (horas : minutos)	Volumen cada 15 minutos $Q_{15(i)}$
07:00-07:15	412
07:15-07:30	698
07:30-07:45	387
07:45-08:00	307

Tasas de flujo para cada período: q_i

Según la tabla 10.1 y de acuerdo a la ecuación (10.1), las tasas de flujo para los cuatro períodos son:

$$q_1 = \frac{N_1}{T_1} = \frac{412\,veh}{15\,min}\left(\frac{60\,min}{1\,h}\right)$$

$$= 1{,}648\,veh/h$$

$$q_2 = \frac{N_2}{T_2} = \frac{698}{15}(60)$$

$$= 2{,}792\,veh/h$$

$$q_3 = \frac{N_3}{T_3} = \frac{387}{15}(60)$$

$$= 1{,}548\ veh/h$$

$$q_4 = \frac{N_4}{T_4} = \frac{307}{15}(60)$$

$$= 1{,}228\ veh/h$$

Volumen horario: Q

Para la hora efectiva de las 07:00 a las 08:00, el volumen es:

$$Q = Q_{15(1)} + Q_{15(2)} + Q_{15(3)} + Q_{15(4)}$$

$$= 412 + 698 + 387 + 307$$

$$= 1{,}804\ veh/h$$

Este volumen horario referido a un período de 15 minutos (0.25 horas) es:

$$Q_{15} = (1{,}804\ veh/h)\left(\frac{0.25\ h}{15\ min}\right)$$

$$= \frac{451\ veh}{15\ min}$$

La figura 10.2 muestra los diferentes volúmenes, lo mismo que el volumen horario, eferidos a períodos de 15 minutos.

Figura 10.2 Volúmenes en períodos de 15 minutos

Comparación entre la tasa de flujo máximo y el volumen horario:

De acuerdo a los valores obtenidos anteriormente, la tasa de flujo máximo corresponde al segundo período. Por lo tanto:

$$q_{máx} = q_2 = 2{,}792\ veh/h$$

$$Q = 1{,}804\ veh/h$$

$q_2 > Q$, significa que la frecuencia con la que pasaron los vehículos en el segundo cuarto de hora fue mayor que la frecuencia con la que pasaron en toda la hora efectiva. Esto muestra la concentración de vehículos en cortos intervalos de tiempo, que en caso de tratarse de períodos de máximas demandas, puede generar problemas de congestión. Esta conclusión, manifiesta la importancia de tomar en cuenta los volúmenes vehiculares en períodos cortos, que al ser altos causan congestión y, por consiguiente, demoras, tal como se aprecia también en la figura 10.2.

Ejemplo 10.2

Sobre una determinada calzada de una arteria urbana de tres carriles se cronometraron los tiempos de paso de cada uno de los vehículos por un punto de referencia, tal como se indica en la tabla 10.2. Se quiere calcular la tasa de flujo para el período de estudio, calcular el intervalo promedio y representar e interpretar gráficamente los diversos intervalos simples y el intervalo promedio.

Tabla 10.2 Tasas de flujo e intervalos

Vehículo número	Tiempo de paso (h:min:s)	Vehículo número	Tiempo de paso (h:min:s)	Vehículo número	Tiempo de paso (h:min:s)
1	11:30:00	21	11:31:26	41	11:33:11
2	11:30:10	22	11:31:27	42	11:33:35
3	11:30:11	23	11:31:32	43	11:33:38
4	11:30:14	24	11:31:34	44	11:34:04
5	11:30:15	25	11:31:38	45	11:34:09
6	11:30:19	26	11:31:41	46	11:34:12
7	11:30:24	27	11:31:42	47	11:34:16
8	11:30:34	28	11:31:45	48	11:34:17
9	11:30:35	29	11:31:50	49	11:34:20
10	11:30:36	30	11:31:59	50	11:34:24
11	11:30:37	31	11:32:22	51	11:34:26
12	11:30:43	32	11:32:30	52	11:34:27
13	11:30:44	33	11:32:44	53	11:34:32
14	11:30:50	34	11:32:46	54	11:34:40
15	11:31:54	35	11:32:52	55	11:34:42
16	11:31:04	36	11:32:59	56	11:34:46
17	11:31:06	37	11:33:02	57	11:34:48
18	11:31:12	38	11:33:04	58	11:34:55
19	11:31:15	39	11:33:09	59	11:34:56
20	11:31:22	40	11:33:10	60	11:35:00

Tasa de flujo: q

Según la tabla 10.2 se aforaron 60 vehículos (N) durante 5 minutos (T), por lo que de acuerdo a la ecuación (10.1), se tiene:

$$q = \frac{N}{T} = \frac{60\ veh}{5\ min}\left(\frac{60\ min}{1\ h}\right)$$

$$= 720\ veh/h$$

Intervalo promedio: $\bar{h}$

Con base en la tabla 10.2, se elabora la tabla 10.3 que muestra los intervalos simples entre pares de vehículos consecutivos.

Tabla 10.3 Intervalos simples entre pares de vehículos consecutivos

Intervalo h_i en s (veh i y veh $i+1$)	Intervalo h_i en s (veh i y veh $i+1$)	Intervalo h_i en s (veh i y veh $i+1$)	Intervalo h_i en s (veh i y veh $i+1$)
10 (1 y 2)	2 (16 y 17)	8 (31 y 32)	4 (46 y 47)
1 (2 y 3)	6 (17 y 18)	14 (32 y 33)	1 (47 y 48)
3 (3 y 4)	3 (18 y 19)	2 (33 y 34)	3 (48 y 49)
1 (4 y 5)	7 (19 y 20)	6 (34 y 35)	4 (49 y 50)
4 (5 y 6)	4 (20 y 21)	7 (35 y 36)	2 (50 y 51)
5 (6 y 7)	1 (21 y 22)	3 (36 y 37)	1 (51 y 52)
10 (7 y 8)	5 (22 y 23)	2 (37 y 38)	5 (52 y 53)
1 (8 y 9)	2 (23 y 24)	5 (38 y 39)	8 (53 y 54)
1 (9 y 10)	4 (24 y 25)	1 (39 y 40)	2 (54 y 55)
1 (10 y 11)	3 (25 y 26)	1 (40 y 41)	4 (55 y 56)
6 (11 y 12)	1 (26 y 27)	24 (41 y 42)	2 (56 y 57)
1 (12 y 13)	3 (27 y 28)	3 (42 y 43)	7 (57 y 58)
6 (13 y 14)	5 (28 y 29)	26 (43 y 44)	1 (58 y 59)
4 (14 y 15)	9 (29 y 30)	5 (44 y 45)	4 (59 y 60)
10 (15 y 16)	23 (30 y 31)	3 (45 y 46)	

De acuerdo a la ecuación (10.2):

$$\bar{h} = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} h_i}{N-1} = \frac{\sum_{i=1}^{60-1} h_i}{60-1}$$

$$= \frac{10+1+3+.....+1+4}{59}$$

$$= \frac{300\ s}{59\ veh}$$

$$= 5.08\ s/veh$$

El intervalo promedio también se puede calcular utilizando la ecuación (10.3), así:

$$\bar{h} = \frac{1}{q} = \frac{1}{720\ veh/h}\left(\frac{3{,}600\ s}{1\ h}\right)$$

$$= 5.00\ s/veh$$

Interpretación gráfica de los intervalos:

En la figura 10.3 aparecen los diversos intervalos simples para cada par de vehículos consecutivos, lo mismo que el intervalo promedio. Las partes sombreadas por debajo de la línea del intervalo promedio indican que varios vehículos circulan a intervalos pequeños, formando grupos, que reflejan concentraciones vehiculares que se mueven a lo largo del tiempo en forma de ondas.

Figura 10.3 *Intervalos simples entre pares de vehículos consecutivos e intervalo promedio*

10.2.2 Variables relacionadas con la velocidad

Las variables del flujo vehicular relacionadas con la velocidad son la *velocidad de punto*, la *velocidad instantánea*, la *velocidad media temporal*, la *velocidad media espacial*, la *velocidad de recorrido*, la *velocidad de marcha*, la *distancia de recorrido* y el *tiempo de recorrido*.

En el capítulo 9 son tratadas de manera amplia todas las variables anteriores y las distintas relaciones entre ellas.

10.2.3 Variables relacionadas con la densidad

Las variables del flujo vehicular relacionadas con la densidad son la *densidad* o *concentración*, el *espaciamiento simple* entre vehículos consecutivos y el *espaciamiento promedio* entre varios vehículos.

1. *Densidad o concentración* (k)

Es el número, N, de vehículos que ocupan una longitud específica, d, de una vialidad en un momento dado. Generalmente se expresa en vehículos por kilómetro (veh/km), ya sea referido a un carril o a todos los carriles de una calzada. Según la figura 10.4, se calcula como:

$$k = \frac{N}{d} \tag{10.4}$$

Figura 10.4 *Densidad o concentración*

2. *Espaciamiento simple* (s_i)

Es la distancia entre el paso de dos vehículos consecutivos, usualmente expresada en metros y medida entre sus defensas traseras.

3. *Espaciamiento promedio* ($\bar{s}$)

Es el promedio de todos los espaciamientos simples, s_i, existentes entre los diversos vehículos que circulan por una vialidad. Por tratarse de un promedio se expresa en metros por vehículo (m/veh) y se calcula, de acuerdo a la figura 10.5, mediante la siguiente expresión:

$$\bar{s} = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} s_i}{N-1} \tag{10.5}$$

Donde:

$\bar{s}$ = espaciamiento promedio (m/veh)
N = número de vehículos (veh)
$N-1$ = número de espaciamientos (veh)
s_i = espaciamiento simple entre el vehículo i y el vehículo $i+1$

Figura 10.5 Espaciamientos entre vehículos

Obsérvese que las unidades del *espaciamiento promedio* $\bar{s}$ (m/veh) son las unidades inversas de la *densidad* k (veh/m), por lo que también puede plantearse la siguiente relación:

$$\bar{s} = \frac{1}{k} \tag{10.6}$$

Ejemplo 10.3

En un tramo de un kilómetro de una autopista de tres carriles por sentido, en un instante dado son observados 30 vehículos en el carril de la derecha, 20 vehículos en el carril central y 18 vehículos en el carril de la izquierda. Se desea calcular las densidades por carriles y por toda la calzada, y estimar el espaciamiento promedio.

<u>*Densidades:*</u> k

De acuerdo a la ecuación (10.4), la densidad para cada carril (de la derecha = k_D, del centro = k_C, de la izquierda = k_I) es:

$$k_D = \frac{N_D}{d} = \frac{30\,veh}{1\,km}$$
$$= 30\,veh/km$$

$$k_C = \frac{N_C}{d} = \frac{20\,veh}{1\,km}$$
$$= 20\,veh/km$$

$$k_I = \frac{N_I}{d} = \frac{18\,veh}{1\,km}$$
$$= 18\,veh/km$$

La densidad para toda la autopista es:

$$k_{autopista} = \frac{N_D + N_C + N_I}{d}$$

$$= \frac{30\,veh + 20\,veh + 18\,veh}{1\,km}$$

$$= 68\,veh/km$$

Espaciamiento promedio: $\bar{s}$

Según la ecuación (10.6), el espaciamiento promedio para cada carril es:

$$\bar{s}_D = \frac{1}{k_D} = \frac{1}{30\ veh/km}\left(\frac{1{,}000\ m}{1\ km}\right)$$
$$= 33.33\ m/veh$$

$$\bar{s}_C = \frac{1}{k_C} = \frac{1}{20}(1{,}000)$$
$$= 50.00\ m/veh$$

$$\bar{s}_I = \frac{1}{k_I} = \frac{1}{18}(1{,}000)$$
$$= 55.56\ m/veh$$

Ejemplo 10.4

Este ejemplo permite entender las características microscópicas del flujo vehicular, mediante el análisis de las distribuciones de intervalos y espaciamientos, y sus relaciones con el flujo y la densidad. Para tal efecto, se utiliza el diagrama espacio-tiempo, que es un gráfico que describe la relación entre la ubicación de los vehículos en una corriente vehicular (espaciamientos), y el tiempo (intervalos) a medida que los vehículos avanzan a lo largo de un carril de una carretera o calle. En la figura 10.6 se muestra un diagrama espacio-tiempo para cuatro vehículos, donde el eje vertical representa la distancia y el eje horizontal el tiempo.

1. *En el punto de observación* $A\ (K0+000)$ *en el tiempo cero* $(t = 0)$

Posición de los vehículos:

El *vehículo 1* está a *50 m* de *A*

El *vehículo 2* está a *25 m* de *A*

El *vehículo 3* está a *10 m* de *A*

El *vehículo 4* está a *0 m* de *A*

Espaciamientos y densidad:

$s_1 = 50 - 25 = 25\ m$

$s_2 = 25 - 10 = 15\ m$

$s_3 = 10 - 0 = 10\ m$

Figura 10.6 *Variables del flujo vehicular en el espacio y el tiempo*

El espaciamiento promedio, de acuerdo a la ecuación (10.5), es:

$$\bar{s} = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} s_i}{N-1} = \frac{\sum_{i=1}^{4-1} s_i}{4-1}$$

$$= \frac{25+15+10}{3}$$

$$= 16.67 \text{ m/veh}$$

Por lo tanto, la densidad media estimada es:

$$k = \frac{1}{\bar{s}} = \frac{1}{16.67 \text{ m/veh}\left(\frac{1 \text{ km}}{1{,}000 \text{ m}}\right)}$$

$$= 60 \text{ veh/km}$$

2. ***En el punto de observación B (K0+110) en el tiempo 10 segundos*** $(t = 10\ s)$

Posición de los vehículos:

El *vehículo 1* está a $200 - 110 = 90\ m$ de B

El *vehículo 2* está a $170 - 110 = 60\ m$ de B

El *vehículo 3* está a $135 - 110 = 25\ m$ de B

El *vehículo 4* está a $110 - 110 = 0\ m$ de B

Espaciamientos y densidad:

$$s_1 = 200 - 170 = 30\ m$$

$$s_2 = 170 - 135 = 35\ m$$

$$s_3 = 135 - 110 = 25\ m$$

$$\bar{s} = \frac{30 + 35 + 25}{3}$$

$$= 30\ m/veh$$

$$k = \frac{1}{\bar{s}} = \frac{1}{30\ m/veh\left(\frac{1\ km}{1{,}000\ m}\right)}$$

$$= 33.3\ veh/km$$

Velocidades:

La velocidad de un vehículo para un instante t, es la pendiente del diagrama espacio-tiempo para ese vehículo en el instante t. Para este ejemplo, los cuatro vehículos se mueven a velocidades constantes, ya que las pendientes de sus líneas asociadas, son constantes. De otra manera, una línea curva, significa un cambio de pendiente, es decir un cambio de velocidad, que implica la aceleración.

Durante 10 segundos los vehículos recorren las siguientes distancias:

El *vehículo 1* : $d_1 = 200 - 50 = 150\ m$

El *vehículo 2* : $d_2 = 170 - 25 = 145\ m$

El *vehículo 3* : $d_3 = 135 - 10 = 125\ m$

El *vehículo 4* : $d_4 = 110 - 0 = 110\ m$

Y desarrollan las siguientes velocidades:

$$v = \frac{d}{t}$$

El *vehículo 1* : $v_1 = \frac{150\ m}{10\ s}(3.6) = 54.0\ km/h$

El *vehículo 2* : $v_2 = \frac{145\ m}{10\ s}(3.6) = 52.2\ km/h$

El *vehículo 3* : $v_3 = \frac{125\ m}{10\ s}(3.6) = 45.0\ km/h$

El *vehículo 4* : $v_4 = \frac{110\ m}{10\ s}(3.6) = 39.6\ km/h$

Tiempo al cual pasan los vehículos por el punto: B

$$t = \frac{d}{v}$$

El *vehículo 1* : $t_1 = \frac{(110 - 50)m}{54.0\ km/h}(3.6) = 4.00\ s$

El *vehículo 2* : $t_2 = \frac{(110 - 25)m}{52.2\ km/h}(3.6) = 5.86\ s$

El *vehículo 3* : $t_3 = \frac{(110 - 10)m}{45.0\ km/h}(3.6) = 8.00\ s$

El *vehículo 4* : $t_4 = \frac{(110 - 0)m}{39.6\ km/h}(3.6) = 10.00\ s$

Intervalos entre vehículos en el punto: B

Entre el *vehículo 1* y el *vehículo 2*:

$h_1 = t_2 - t_1 = 5.86 - 4.00 = 1.86\ s$

Entre el *vehículo 2* y el *vehículo 3* :

$h_2 = t_3 - t_2 = 8.00 - 5.86 = 2.14\ s$

Entre el *vehículo 3* y el *vehículo 4* :

$h_3 = t_4 - t_3 = 10.00 - 8.00 = 2.00\ s$

El intervalo promedio, de acuerdo a la ecuación (10.2), es:

$$\bar{h} = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} h_i}{N-1} = \frac{\sum_{i=1}^{4-1} h_i}{4-1}$$

$$= \frac{1.86 + 2.14 + 2.00}{3}$$

$$= 2.00 \text{ s/veh}$$

Tasa de flujo en el punto: B

$$q = \frac{1}{\bar{h}} = \frac{1}{2.00 \text{ s/veh}}\left(\frac{3{,}600 \text{ s}}{1 \text{ h}}\right)$$

$$= 1{,}800 \text{ veh/h}$$

De otra manera, también se puede decir que durante 6 segundos ($T = 10 - 4$) pasan 3 vehículos ($N = 3$), por lo que:

$$q = \frac{N}{T} = \frac{3 \text{ veh}}{6 \text{ s}}\left(\frac{3{,}600 \text{ s}}{1 \text{ h}}\right)$$

$$= 1{,}800 \text{ veh/h}$$

Igualmente, también se puede asociar un flujo instantáneo q_i a cada par de vehículos consecutivos de intervalo h_i, así:

$$q_i = \frac{1}{h_i}$$

$$h_i = \frac{1}{q_i}$$

Por lo tanto, la tasa de flujo es:

$$q = \frac{1}{\bar{h}} = \frac{1}{\dfrac{\sum_{i=1}^{N-1} h_i}{N-1}} = \frac{N-1}{\sum_{i=1}^{N-1} h_i}$$

Esto es:

$$q = \frac{N-1}{\sum_{1=1}^{N-1} \frac{1}{q_i}}$$

Lo que quiere decir, que la tasa de flujo es la media armónica de los flujos individuales.

De allí que:

$$q_1 = \frac{1}{h_1} = \frac{1}{1.86\ s/veh}\left(\frac{3{,}600\ s}{1\ h}\right)$$

$$= 1{,}935.5\ veh/h$$

$$q_2 = \frac{1}{h_2} = \frac{1}{2.14\ s/veh}\left(\frac{3{,}600\ s}{1\ h}\right)$$

$$= 1{,}682.2\ veh/h$$

$$q_3 = \frac{1}{h_3} = \frac{1}{2.00\ s/veh}\left(\frac{3{,}600\ s}{1\ h}\right)$$

$$= 1{,}800.0\ veh/h$$

$$q = \frac{N-1}{\sum_{1=1}^{N-1} \frac{1}{q_i}} = \frac{4-1}{\frac{1}{1{,}935.5} + \frac{1}{1{,}682.2} + \frac{1}{1{,}800.0}}$$

$$= 1{,}800\ veh/h$$

10.2.4 Relación entre el flujo, la velocidad, la densidad, el intervalo y el espaciamiento

El esquema de la figura 10.7 muestra un par de vehículos consecutivos a los cuales se les han asociado atributos tanto en el *tiempo* como en el *espacio*. Así, por ejemplo, el *paso* es el tiempo necesario para que el vehículo recorra su propia *longitud*, y la *brecha* o *claro* es el intervalo de tiempo libre disponible entre los dos vehículos, equivalente a la *separación* entre ellos medida desde la defensa trasera del primer vehículo hasta la defensa delantera del segundo vehículo, dividida por la *velocidad* (la del segundo vehículo o la del grupo de vehículos si todos ellos viajan a la misma velocidad).

Figura 10.7 *Relaciones de tiempo y espacio entre vehículos*

Con base en la figura 10.7, y considerando un *grupo* vehicular que se mueve a *velocidad* ($\bar{v}_e$) aproximadamente constante, su *intervalo promedio* ($\bar{h}$) y *espaciamiento promedio* ($\bar{s}$) se pueden relacionar así:

$$Espacio = (Velocidad)(Tiempo)$$

$$\bar{s} = \bar{v}_e \bar{h} \tag{10.7}$$

Como se puede ver en la expresión anterior, para un grupo de vehículos, el intervalo promedio y el espaciamiento promedio se relacionan a través de la velocidad media espacial.

También, como cualquier otro fluido continuo, el flujo de la corriente de tránsito puede definirse en términos de sus tres variables principales: la *tasa de flujo* q, la *velocidad* v y la *densidad* k.

Por las ecuaciones (10.3) y (10.6), se sabe que:

$$\bar{h} = \frac{1}{q}$$

$$\bar{s} = \frac{1}{k}$$

Reemplazando los dos valores anteriores en la ecuación (10.7), queda:

$$\frac{1}{k} = \bar{v}_e \left(\frac{1}{q}\right)$$

De donde:

$$q = \bar{v}_e k \tag{10.8}$$

A la anterior correlación se le conoce como la *ecuación fundamental del flujo vehicular,* que en *forma general* se expresa como:

$$q = vk \tag{10.9}$$

Los resultados numéricos dados por la ecuación fundamental del flujo vehicular dependen del método de medición empleado para definir cada una de sus variables y de la forma de promediarlas, ya que, como es conocido, existen mediciones de tipo puntual, mediciones sobre distancias o tramos específicos y mediciones dentro de todo un sistema.

Ejemplo 10.5

En un punto de una vialidad se contaron 105 vehículos durante 15 minutos. A lado y lado del punto anterior y en una distancia de 50 metros de longitud, se cronometraron los tiempos tomados en recorrerla por una muestra de 30 vehículos, dando los siguientes valores:

7 vehículos emplearon 2.0 segundos
9 vehículos emplearon 2.5 segundos
8 vehículos emplearon 2.8 segundos
6 vehículos emplearon 3.0 segundos

Se quiere calcular la tasa de flujo, el intervalo promedio, la velocidad media espacial, la densidad y el espaciamiento promedio.

Tasa de flujo: q

$$q = \frac{N}{T} = \frac{105\ veh}{15\ min}\left(\frac{60\ min}{1\ h}\right) = 420\ veh/h$$
$$= 420\ veh/h$$

Intervalo promedio: $\bar{h}$

$$\bar{h} = \frac{1}{q} = \frac{1}{420\ veh/h}\left(\frac{3{,}600\ seg}{1\ h}\right) = 8.57\ seg/veh$$
$$= 8.57\ seg/veh$$

Velocidad media espacial: $\bar{v}_e$

En el capítulo 9, según la ecuación (9.5), se definió la velocidad media espacial en términos de la distancia dada y el tiempo de recorrido como:

$$\bar{v}_e = \frac{d}{\bar{t}} = \frac{d}{\dfrac{\sum_{i=1}^{N}(f_i t_i)}{n}} = \frac{d}{\dfrac{\sum_{i=1}^{4}(f_i t_i)}{30}}$$

$$\bar{v}_e = \frac{50\ m}{\dfrac{7(2.0\ s)+9(2.5\ s)+8(2.8\ s)+6(3.0\ s)}{30}}\left(\frac{1\ km}{1{,}000\ m}\right)\left(\frac{3{,}600\ s}{1\ h}\right)$$
$$= 70.2\ km/h$$

Densidad: k

Despejando k de la ecuación (10.8), se tiene:

$$k = \frac{q}{\bar{v}_e} = \frac{420\ veh/h}{70.2\ km/h}$$
$$= 5.98\ veh/km \approx 6\ veh/km$$

Espaciamiento promedio: $\bar{s}$

$$\bar{s} = \frac{1}{k} = \frac{1}{5.98\ veh/km}\left(\frac{1{,}000\ m}{1\ km}\right)$$

$$= 167.22\ m/veh$$

10.3 Modelos básicos del flujo vehicular

Los anteriores conceptos y relaciones fundamentales, constituyen el punto de partida para analizar aún más las características del flujo vehicular a través de sus *tres variables principales: flujo* (q), *velocidad* (v) y *densidad* (k), relacionadas mediante la *ecuación fundamental del flujo vehicular,* que como se demostró, su forma general es:

$$q = vk \tag{10.10}$$

Si se establece una relación entre cualquiera dos de las tres variables, la relación de estas dos con la tercera la determina la ecuación $q = vk$. Naturalmente, las posibles combinaciones son *velocidad-densidad* (v, k), *flujo-densidad* (q, k) y *velocidad-flujo* (v, q). La variable más fácil de medir es el flujo q, siguiéndole en su orden la velocidad v y la densidad k. Por esta razón, usualmente se considera la densidad k como la variable dependiente. De todas maneras no existe una variable dependiente aislada, como tampoco existe cuando se representa un punto en el espacio en función de sus tres coordenadas (x, y, z). Por lo tanto, es de gran ayuda visualizar la *ecuación fundamental del flujo vehicular,* considerando la superficie que representa, cuando se grafica sobre ejes mutuamente perpendiculares en el espacio, tal como se ilustra en la figura 10.8.

Uno de los objetivos finales que busca el ingeniero de tránsito, es el de optimizar la operación de los sistemas de tránsito existentes y el de intervenir en el proyecto de sistemas viales futuros bastante eficientes. De esta manera, la *optimización* en tránsito indica la selección de las mejores condiciones de operación, sujeto a las habilidades del sistema o recursos y a las restricciones del usuario y del medio ambiente.

Las *medidas de efectividad*, que entran en el *objetivo* definido como una *función,* inherentes en el criterio de optimización, serán aquellas que se puedan expresar como una función de las variables de tránsito presentes en el problema, llamadas *variables de decisión.* La tarea es, desde luego, elegir valores para las variables de decisión o control que hagan óptima la función objetivo.

En los modelos *determinísticos*, los cuales otorgan un valor preciso para cada medida de efectividad definida al tomar ciertos valores específicos las variables de decisión, aplicados a problemas de tránsito, se supone que las relaciones funcionales entre las variables de entrada y los parámetros que miden la efectividad son constantes. Esto es, sólo ocurrirá *un valor* de la función objetivo para cualquier *conjunto dado de valores* de las variables de entrada.

En general los modelos del flujo vehicular se pueden clasificar en dos grandes clases: microscópicos y macroscópicos. Los *modelos microscópicos* consideran los

espaciamientos y las velocidades individuales de los vehículos, con base en la teoría del seguimiento vehicular. Los *modelos macroscópicos* describen la operación vehicular en términos de sus variables de flujo, generalmente tomadas como promedios. A su vez, estos modelos del flujo vehícular son la base de la *simulación* microscópica y macroscópica.

Figura 10.8 *Relación fundamental del flujo vehicular*

Los esfuerzos en tratar de relacionar las diferentes parejas de las tres variables principales del flujo vehicular (q, v, k) se han basado en toma de datos y ajuste simple a curvas o regresión, en métodos deductivos a partir de condiciones límite o de frontera y en analogías físicas. Estas tres formas de aproximarse al fenómeno del tránsito, han dado como resultado el desarrollo de modelos macroscópicos, los cuales suponen un movimiento homogéneo o condiciones de *flujo estacionario* y describen las características generales o globales de la corriente vehicular. A continuación se analizan algunos de estos modelos.

10.3.1 Modelo lineal

B.D. Greenshields [2] llevó a cabo una de las primeras investigaciones sobre el comportamiento del flujo vehicular, en la cual estudió la relación existente entre

la velocidad y la densidad. Utilizando un conjunto de datos (k,v), para diferentes condiciones del tránsito, propuso una relación lineal entre la *velocidad* v y la *densidad* k, que mediante el ajuste por el método de los mínimos cuadrados [3], según la figura 10.9, se llega al *modelo lineal* siguiente:

$$\bar{v}_e = v_l - \left(\frac{v_l}{k_c}\right)k \tag{10.11}$$

Donde:

$\bar{v}_e$ = velocidad media espacial (km/h)
k = densidad (veh/km/carril)
v_l = velocidad media espacial a flujo libre (km/h)
k_c = densidad de congestionamiento (veh/km/carril)

Figura 10.9 Relación lineal entre la velocidad y la densidad

En general la velocidad disminuye a medida que aumenta la densidad, desde un valor máximo o velocidad a flujo libre v_l (punto A), hasta un valor mínimo $\bar{v}_e = 0$ (punto B) donde la densidad alcanza su máximo valor o de congestionamiento k_c.

Obviamente, en la práctica, la densidad nunca toma el valor de cero, lo cual quiere decir que para que exista velocidad a flujo libre, debe presentarse al menos un vehículo sobre la calle o carretera circulando a esa velocidad. Bajo esta condición, la densidad es muy baja, tal que el vehículo o los pocos vehículos circulan libremente a la velocidad máxima o límite establecida para la vialidad. En el otro extremo, al presentarse congestionamiento, los vehículos están detenidos uno tras otro.

El flujo, q, se puede representar en el diagrama velocidad-densidad, a través de la ecuación fundamental $q = vk$, donde para cualquier punto sobre la recta de coordenadas (k,v), el producto vk es el área de un rectángulo cuyo lado horizontal es la densidad k y cuyo lado vertical es la velocidad v. Así, por ejemplo, para los puntos C y D, los flujos asociados a las densidades y velocidades correspondientes son:

$$q_C = v_C k_C$$
$$q_D = v_D k_D$$

El rectángulo de área máxima corresponde al punto E, que está ubic exactamente en la mitad de la recta. Su área, sombreada en la figura 10.9, represen *flujo máximo*, q_m, el cual se obtiene para los valores siguientes de v_m y k_m:

$$v_m = \frac{v_l}{2} \qquad (10$$

$$k_m = \frac{k_c}{2} \qquad (10$$

Por lo tanto, el flujo máximo es:

$$q_m = v_m k_m \qquad (10$$

O lo que es lo mismo:

$$q_m = \frac{v_l k_c}{4} \qquad (10$$

La relación entre el *flujo* q y la *densidad* k, se obtiene reemplazando la ecua (10.11) en la ecuación fundamental (10.10), así:

$$q = vk = \left[v_l - \left(\frac{v_l}{k_c} \right) k \right] k$$

$$q = v_l k - \left(\frac{v_l}{k_c} \right) k^2 \qquad (10.$$

Esta ecuación expresa al flujo q como una función parabólica de la densida Por lo tanto, la forma de la curva, mostrada en la figura 10.10, es la de una paráb

Figura 10.10 *Relación parabólica entre el flujo y la densidad*

Por definición se requiere que cuando la densidad se aproxime a cero, el flujo también se aproxime a cero, lo cual representa condiciones de operación a flujo libre (punto A). Igualmente, cuando la densidad es la máxima, $k = k_c$, los vehículos se detienen uno tras otro, defensa delantera a defensa trasera, tal que no avanzan, $q = 0$ (punto B).

Entre los dos extremos anteriores, existe una diversidad de condiciones del flujo vehicular, identificadas por los puntos C, D y E, reflejando éste último características de operación a flujo máximo o capacidad, $q = q_m$.

La velocidad, v, se puede también representar en el diagrama flujo-densidad, despejándola de la ecuación fundamental $q = vk$:

$$v = \frac{q}{k} \tag{10.17}$$

La expresión anterior es la pendiente del vector dirigido desde el origen A a cualquier punto sobre la curva. Así, para los puntos C, D y E, se tiene:

$$\text{Pendiente de } AC = v_C = \frac{q_C}{k_C}$$

$$\text{Pendiente de } AD = v_D = \frac{q_D}{k_D}$$

$$\text{Pendiente de } AE = v_m = \frac{q_m}{k_m}$$

Obsérvese que a la densidad de congestionamiento, $k = k_c$ (punto B), la pendiente del vector AB es cero, indicando que no existe velocidad pues los vehículos están completamente detenidos o en un congestionamiento total. En la medida en que el flujo q y la densidad k se aproximan a cero, el vector tiende a ser tangente a la curva y su pendiente representa la velocidad a flujo libre v_l. El valor de la velocidad a flujo libre depende del conductor, de las características de su vehículo, de las características geométricas de la vialidad, ancho de carriles, pendientes, distancias de visibilidad, etc. y de otros factores tales como la iluminación y el estado del tiempo.

La relación entre la *velocidad* v y el *flujo* q, se obtiene despejando la densidad k de la ecuación (10.11) y reemplazando su valor en la ecuación (10.8), de la siguiente manera:

De la ecuación (10.11):

$$k = k_c - \left(\frac{k_c}{v_l}\right)\bar{v}_e$$

Reemplazando en la ecuación (10.8):

$$q = \bar{v}_e k = \bar{v}_e \left[k_c - \left(\frac{k_c}{v_l}\right)\bar{v}_e \right]$$

$$= \bar{v}_e k_c - \left(\frac{k_c}{v_l}\right)(\bar{v}_e)^2$$

De donde:

$$\bar{v}_e = \frac{v_l}{2} \pm \frac{\sqrt{v_l^2 - 4\left(\frac{v_l}{k_c}\right)q}}{2} \tag{10.18}$$

Esta última expresión, representada en la figura 10.11, indica que entre la velocidad y el flujo existe una relación parabólica, donde para un valor determinado del flujo ($q = q_C = q_D$), hay asociados dos valores de la velocidad (v_C y v_D). En la medida que el flujo q aumenta, desde el punto A a velocidad a flujo libre, la velocidad v progresivamente disminuye. De manera que si para una determinada vialidad, el flujo de entrada q (demanda) se aproxima a la capacidad q_m (máxima oferta o servicio), la dinámica del flujo vehicular puede causar que éste se reduzca por debajo de la capacidad, con velocidades correspondientes a la porción inferior de la curva desde el punto E hasta el punto B, indicando que la operación ocurre a nivel de congestión.

Figura 10.11 Relación parabólica entre la velocidad y el flujo

La densidad, k, se puede también representar en el diagrama velocidad-flujo, despejándola de la ecuación fundamental $q = vk$:

$$k = \frac{q}{v} = \frac{1}{\frac{v}{q}}$$

En la expresión anterior, la pendiente del vector dirigido desde el origen B a cualquier punto sobre la curva, es el inverso de la densidad en ese punto. Así, para los puntos C, D y E, se tiene:

$$\textit{Pendiente de } BC = \frac{1}{k_C} = \frac{v_C}{q_C}$$

$$Pendiente\ de\ BD = \frac{1}{k_D} = \frac{v_D}{q_D}$$

$$Pendiente\ de\ BE = \frac{1}{k_m} = \frac{v_m}{q_m}$$

Obsérvese que en los niveles de congestionamiento total, $q = 0$ (punto B), la pendiente del vector en el punto B es casi cero, indicando que los vehículos están completamente detenidos, alcanzándose la densidad máxima o de congestionamiento k_c. Por el contrario, a la velocidad a flujo libre, $v = v_l$ (punto A), la pendiente del vector BA tiende a infinito, indicando que la densidad tiende a cero, es decir, hay pocos vehículos circulando a flujo libre.

En la figura 10.12 aparecen dibujadas las tres relaciones básicas en un sólo diagrama fundamental, el cual permite ver la interrelación entre cada una de ellas. En la práctica cada una de ellas tiene su uso particular [4]. Así, por ejemplo, la relación *velocidad-densidad* es el punto de partida de la mayoría de los modelos o enfoques teóricos del flujo vehicular, puesto que para un simple valor de la densidad existe un sólo valor de la velocidad; esta situación no ocurre en los otros casos. La relación *flujo-densidad* es la base para el control del tránsito en autopistas, puesto que la densidad o concentración se puede expresar en términos del porcentaje de ocupación de tramos específicos en un momento dado. La relación *velocidad-flujo* es utilizada principalmente para identificar los niveles de servicio (velocidades) y los niveles de productividad (flujos).

Figura 10.12 Diagrama fundamental del flujo vehicular

Finalmente, se puede observar que las regiones correspondientes a *flujos de tránsito no congestionados* están limitadas por:

$$0 \le q \le q_m$$

$$v_m \le \bar{v}_e \le v_l$$

$$0 \le k \le k_m$$

Ejemplo 10.6

En un tramo de una carretera, se realizó un estudio de aforos y velocidades en diferentes días para diversas condiciones de operación del tránsito. Esto permitió obtener pares de datos densidad-velocidad media espacial ($k, \bar{v}_e$), que al realizar su ajuste lineal por el método de los mínimos cuadrados dio como velocidad a flujo libre el valor de 76 kilómetros por hora y como densidad de congestionamiento el valor de 152 vehículos por kilómetro por carril. Se sabe además que la longitud promedio de los vehículos es de 5 metros. Se desea determinar: las ecuaciones del modelo lineal que caracterizan este flujo vehicular, el flujo máximo, el intervalo promedio a flujo máximo, el espaciamiento promedio a flujo máximo y la separación promedio entre vehículos a flujo máximo.

<u>*Ecuaciones del modelo lineal:*</u>

Los parámetros del modelo son dados como:

$$v_l = 76\ km/h$$
$$k_c = 152\ veh/km/carril$$

La relación velocidad-densidad, según la ecuación (10.11), es:

$$\bar{v}_e = v_l - \left(\frac{v_l}{k_c}\right)k = 76 - \left(\frac{76}{152}\right)k$$
$$= 76 - 0.5k$$

La relación flujo-densidad, según la ecuación (10.16), es:

$$q = v_l k - \left(\frac{v_l}{k_c}\right)k^2 = 76k - \left(\frac{76}{152}\right)k^2$$
$$= 76k - 0.5k^2$$

La relación velocidad-flujo, según la ecuación (10.18), es:

$$\bar{v}_e = \frac{v_l}{2} \pm \frac{\sqrt{v_l^2 - 4\left(\frac{v_l}{k_c}\right)q}}{2} = \frac{76}{2} \pm \frac{\sqrt{76^2 - 4\left(\frac{76}{152}\right)q}}{2}$$
$$= 38 \pm \sqrt{1{,}444 - 0.5q}$$

Por lo tanto, las ecuaciones del modelo son:

$$\bar{v}_e = 76 - 0.5k$$

$$q = 76k - 0.5k^2$$

$$\bar{v}_e = 38 \pm \sqrt{1{,}444 - 0.5q}$$

Flujo máximo: q_m

De acuerdo a la ecuación (10.15), el flujo máximo es:

$$q_m = \frac{v_f k_c}{4} = \frac{76(152)}{4}$$
$$= 2{,}888 \text{ veh/h/carril}$$

Intervalo promedio a flujo máximo: $\bar{h}_m$

$$\bar{h}_m = \frac{1}{q_m} = \frac{1}{2{,}888 \text{ veh/h/carril}}\left(\frac{3{,}600 \text{ s}}{1 \text{ h}}\right)$$
$$= 1.25 \text{ s/veh/carril}$$

Espaciamiento promedio a flujo máximo: $\bar{s}_m$

$$\bar{s}_m = \frac{1}{k_m} = \frac{1}{\frac{k_c}{2}} = \frac{1}{\frac{152 \text{ veh/km/carril}}{2}}\left(\frac{1{,}000 \text{ m}}{1 \text{ km}}\right)$$
$$= 13.16 \text{ m/veh/carril}$$

Separación promedio entre vehículos a flujo máximo:

De acuerdo a la figura 10.7, presentada anteriormente, la separación entre vehículos se mide entre la defensa trasera del primero y la defensa delantera del segundo. Esto es:

Separación = Espaciamiento - Longitud del segundo vehículo

En condiciones de flujo máximo, en promedio se tiene:

Separación promedio = 13.16 - 5.00 = 8.16 m/veh

Ejemplo 10.7

Con este ejemplo se pretende dar una introducción al concepto de nivel de servicio que ofrece una vialidad existente o que ofrecerá una vialidad en proyecto, bajo condiciones de circulación continua. Para tal efecto, supóngase que se han definido seis características

generales de operación en función de la densidad de congestionamiento, así:

Condiciones de flujo libre:	$0 \le k_1 \le 0.05k_c$
Condiciones de flujo estable:	$0.05k_c \le k_2 \le 0.15k_c$
Condiciones de flujo aún estable:	$0.15k_c \le k_3 \le 0.30k_c$
Condiciones de flujo casi inestable:	$0.30k_c \le k_4 \le 0.40k_c$
Condiciones de flujo inestable:	$0.40k_c \le k_5 \le 0.60k_c$
Condiciones de flujo forzado:	$0.60k_c \le k_6 \le 1.00k_c$

Además, se sabe que el flujo vehicular se ajusta a la siguiente relación lineal entre la velocidad y la densidad:

$$\bar{v}_e = 74 - 0.62k$$

Donde:

$\bar{v}_e$ = velocidad media espacial (km/h)
k = densidad (veh/km/carril)

Se quiere hallar las relaciones de flujo a capacidad que limitan las diversas condiciones de operación, y determinar la calidad del servicio ofrecida a una demanda vehicular de 1,600 veh/h que circula bajo condiciones no congestionadas.

Relaciones de flujo a capacidad: q/q_m

La densidad de congestionamiento se presenta para la velocidad media espacial igual a cero. Por lo tanto:

$$0 = 74 - 0.62k_c$$

De donde:

$$k_c = 119 \text{ veh/km/carril}$$

Los valores máximos de las densidades que limitan cada una de las condiciones de operación dadas, son:

$$k_1 = 0.05k_c = 0.05(119) = 6 \text{ veh/km/carril}$$
$$k_2 = 0.15k_c = 0.15(119) = 18 \text{ veh/km/carril}$$
$$k_3 = 0.30k_c = 0.30(119) = 36 \text{ veh/km/carril}$$
$$k_4 = 0.40k_c = 0.40(119) = 48 \text{ veh/km/carril}$$
$$k_5 = 0.60k_c = 0.60(119) = 71 \text{ veh/km/carril}$$
$$k_6 = 1.00k_c = 1.00(119) = 119 \text{ veh/km/carril}$$

Las velocidades correspondientes a estas densidades, utilizando la ecuación dada, son:

$$\bar{v}_{e_1} = 74 - 0.62k_1 = 74 - 0.62(6) = 70.3\ km/h$$

$$\bar{v}_{e_2} = 74 - 0.62k_2 = 74 - 0.62(18) = 62.8\ km/h$$

$$\bar{v}_{e_3} = 74 - 0.62k_3 = 74 - 0.62(36) = 51.7\ km/h$$

$$\bar{v}_{e_4} = 74 - 0.62k_4 = 74 - 0.62(48) = 44.2\ km/h$$

$$\bar{v}_{e_5} = 74 - 0.62k_5 = 74 - 0.62(71) = 30.0\ km/h$$

$$\bar{v}_{e_6} = 74 - 0.62k_6 = 74 - 0.62(119) = 0.0\ km/h$$

Los flujos correspondientes a las densidades y velocidades anteriores son:

$$q_1 = \bar{v}_{e_1}k_1 = 70.3(6) = 422\ veh/h/carril$$

$$q_2 = \bar{v}_{e_2}k_2 = 62.8(18) = 1{,}130\ veh/h/carril$$

$$q_3 = \bar{v}_{e_3}k_3 = 51.7(36) = 1{,}861\ veh/h/carril$$

$$q_4 = \bar{v}_{e_4}k_4 = 44.2(48) = 2{,}122\ veh/h/carril$$

$$q_5 = \bar{v}_{e_5}k_5 = 30.0(71) = 2{,}130\ veh/h/carril$$

$$q_6 = \bar{v}_{e_6}k_6 = 0.0\ (119) = 0\ veh/h/carril$$

La velocidad a flujo libre se presenta, teóricamente, para la densidad igual a cero. Por lo que en la ecuación inicial dada se tiene:

$$v_l = 74 - 0.62(k) = 74 - 0.62(0) = 74\ km/h$$

La capacidad o flujo máximo según la ecuación (10.15) es:

$$q_m = \frac{v_l k_c}{4} = \frac{74(119)}{4} = 2{,}202\ veh/h/carril$$

De esta manera, las relaciones de flujo a capacidad que limitan las seis condiciones de operación son:

$$\frac{q_1}{q_m} = \frac{422}{2{,}202} = 0.19$$

$$\frac{q_2}{q_m} = \frac{1{,}130}{2{,}202} = 0.51$$

$$\frac{q_3}{q_m} = \frac{1{,}861}{2{,}202} = 0.85$$

$$\frac{q_4}{q_m} = \frac{2{,}122}{2{,}202} = 0.96$$

$$\frac{q_5}{q_m} = \frac{2{,}130}{2{,}202} = 0.96$$

$$\frac{q_6}{q_m} = \frac{0}{2{,}202} = 0.00$$

Utilizando el diagrama fundamental que relaciona la velocidad con el flujo, en la figura 10.13 se ilustran las diversas condiciones de operación.

Calidad de servicio para una demanda de 1,600 veh/h/carril:

Para esta demanda la relación de flujo a capacidad es:

$$\frac{q}{q_m} = \frac{1{,}600}{2{,}202} = 0.73$$

Obsérvese en la figura 10.13 que para una relación de flujo a capacidad de 0.73, el servicio ofrecido por esta vialidad es aún estable, que de acuerdo a la ecuación (10.18) para condiciones de operación no congestionadas, le corresponde una velocidad media espacial de:

$$\bar{v}_e = \frac{v_l}{2} + \frac{\sqrt{v_l^2 - 4\left(\frac{v_l}{k_c}\right)q}}{2} = \frac{74}{2} + \frac{\sqrt{74^2 - 4\left(\frac{74}{119}\right)1{,}600}}{2}$$

$$= 56.3\ km/h$$

Figura 10.13 *Concepto de nivel de servicio*

10.3.2 Modelos no lineales

Otras investigaciones, relacionadas con el comportamiento del flujo vehicular, han llegado a la conclusión de que no siempre existe una buena correlación lineal entre la velocidad y la densidad. En estos casos se logra un mejor ajuste mediante otros modelos, los cuales toman más en cuenta la *curvatura de los datos*. A continuación se mencionan los modelos macroscópicos más clásicos con sus respectivas ecuaciones que relacionan el flujo, la velocidad y la densidad.

1. Modelo logarítmico

Apoyado en la analogía hidrodinámica, H. Greenberg [5] combina las ecuaciones de movimiento y continuidad de los fluidos compresibles y, al aplicarlas al flujo vehicular, obtiene las siguientes relaciones:

$$\bar{v}_e = v_m \, ln\left(\frac{k_c}{k}\right) \tag{10.19}$$

$$q = v_m k \, ln\left(\frac{k_c}{k}\right) \tag{10.20}$$

Este modelo da buenos ajustes, especialmente en *flujos congestionados*, ya que no funciona muy bien a bajas densidades como puede observarse en la ecuación (10.19), debido a que cuando k tiende a cero la velocidad se hace tan grande que puede llegar a ser infinita, que sería la condición a flujo libre. Por lo tanto, los *parámetros del modelo* son la velocidad a flujo máximo v_m y la densidad de congestionamiento k_c, los cuales deben ser especificados, pues a partir de ellos se determinan otras características del flujo vehicular en estudio.

Para condiciones de flujo máximo:

$$\bar{v}_e = v_m \text{ y } k = k_m$$

Reemplazando la velocidad y la densidad a flujo máximo en la ecuación (10.19), se tiene:

$$v_m = v_m \, ln\left(\frac{k_c}{k_m}\right)$$

$$ln\left(\frac{k_c}{k_m}\right) = 1$$

De donde:

$$k_m = \frac{k_c}{e} \tag{10.21}$$

$$e = 2.718282$$

Y, por lo tanto, el flujo máximo q_m o capacidad es:

$$q_m = v_m k_m = \frac{v_m k_c}{e} \tag{10.22}$$

Ejemplo 10.8

Para un flujo de tránsito congestionado, se determinó como velocidad a flujo máximo el valor de 28 km/h y como densidad de congestionamiento el valor de 142 veh/km/carril. Se desea plantear las ecuaciones del modelo logarítmico, calcular la velocidad y el flujo para una densidad de 80 veh/km/carril, y calcular la capacidad.

Ecuaciones del modelo:

Para la información dada se tiene:

$v_m = 28\ km/h$ y $k_c = 142\ veh/km/carril$

Luego según las expresiones (10.19) y (10.20), las ecuaciones del modelo son:

$$\bar{v}_e = v_m \ln\left(\frac{k_c}{k}\right) = 28 \ln\left(\frac{142}{k}\right)$$

$$q = v_m k \ln\left(\frac{k_c}{k}\right) = 28k \ln\left(\frac{142}{k}\right)$$

Velocidad y flujo para una densidad de 80 veh/km/carril:

Reemplazando el valor de esta densidad en las expresiones anteriores, se obtiene:

$$\bar{v}_e = 28 \ln\left(\frac{142}{80}\right) = 16.1\ km/h$$

$$q = 28(80)\ln\left(\frac{142}{80}\right) = 1{,}285\ veh/h/carril$$

Capacidad:

Utilizando la ecuación (10.22), la capacidad es:

$$q_m = \frac{v_m k_c}{e} = \frac{28(142)}{2.718282} = 1{,}463\ veh/h/carril$$

En la figura 10.14 se muestra el diagrama del flujo vehicular correspondiente a este ejemplo, según el modelo logarítmico.

Figura 10.14 Modelo logarítmico del flujo vehicular

2. *Modelos exponenciales*

R.T. Underwood [6], interesado por el análisis del régimen a flujo libre, desarrolla el siguiente modelo exponencial para *flujos no congestionados:*

$$\overline{v}_e = v_l e^{-k/k_m} \tag{10.23}$$

$$q = v_l k e^{-k/k_m} \tag{10.24}$$

Como puede verse en la ecuación (10.23) el modelo no representa la velocidad igual a cero para altas densidades, que sería la condición de congestionamiento. Por esta razón los *parámetros del modelo* son la densidad a flujo máximo k_m y la velocidad a flujo libre v_l.

Para condiciones de flujo máximo (k_m, v_m), la ecuación (10.23) se convierte en:

$$v_m = v_l e^{-k_m/k_m}$$

De donde:

$$v_m = \frac{v_l}{e} \tag{10.25}$$

El valor del flujo máximo o capacidad es:

$$q_m = v_m k_m = \frac{v_l k_m}{e} \tag{10.26}$$

Ejemplo 10.9

En un estudio de flujos no congestionados en una vialidad, se determinó como velocidad a flujo libre el valor de 80 km/h y como densidad a capacidad el valor de 60 veh/km/carril. Se quiere plantear las ecuaciones del modelo exponencial y calcular la capacidad.

Ecuaciones del modelo:

Reemplazando la velocidad a flujo libre y la densidad a capacidad en las ecuaciones (10.23) y (10.24), para este flujo vehicular se tienen las siguientes expresiones:

$$\bar{v}_e = v_l e^{-k/k_m} = 80e^{-k/60}$$

$$q = v_l k e^{-k/k_m} = 80ke^{-k/60}$$

Capacidad:

De acuerdo a la ecuación (10.26), la capacidad es:

$$q_m = \frac{v_l k_m}{e} = \frac{80(60)}{2.718282} = 1{,}766 \text{ veh/h/carril}$$

En la figura 10.15 se presenta el diagrama fundamental correspondiente al modelo exponencial, según este ejemplo.

Por otra parte, dentro de los *modelos exponenciales,* como lo menciona A.D. May [4], un grupo de investigación de la Universidad de Northwestern [7] concluye que la gran mayoría de las curvas velocidad-densidad tienen la forma de una *S* o de campana. Tal grupo propone la siguiente ecuación de tipo exponencial de segundo orden:

$$\bar{v}_e = v_l e^{-0.5(k/k_m)^2} \tag{10.27}$$

Figura 10.15 Modelo exponencial del flujo vehicular

3. *Otros modelos*

L.A. Pipes [8] y P.K. Munjal [9] obtuvieron una familia de modelos de la forma:

$$\bar{v}_e = v_l\left[1-\left(\frac{k}{k_c}\right)^n\right] \tag{10.28}$$

Donde n es un número real mayor que cero. Nótese que cuando $n=1$, la expresión se transforma en el modelo lineal de Greenshields.

D.R. Drew [10] propone el siguiente modelo parabólico:

$$\bar{v}_e = v_l\left[1-\left(\frac{k}{k_c}\right)^n\right] \longrightarrow 0.5 \tag{10.29}$$

10.4 Descripción probabilística del flujo vehicular

Si todos los vehículos que circulan por una determinada vialidad se encuentran espaciados *uniformemente,* sería fácil determinar su flujo y los diferentes niveles de congestionamiento. Sin embargo, en muchos casos los vehículos no viajan a intervalos uniformes, sino que lo hacen en *grupos* con un intervalo promedio para cada uno, reflejando concentraciones vehiculares que se mueven en forma de ondas a través del tiempo.

Más aún, en situaciones más cercanas a la realidad, los vehículos circulan en forma completamente *dispersa.* Todos aquellos enfoques que tratan de tener en cuenta la heterogeneidad del flujo, suponen que el patrón de llegadas o de paso de los vehículos corresponde, en cierta manera, a un proceso *aleatorio.* En muchos problemas de ingeniería de tránsito es de gran utilidad describir el flujo vehicular, de tal manera que conserve algunas de sus características *discretas,* considerando de esta forma los aspectos *probabilísticos* de su comportamiento [11].

Para seleccionar la distribución de probabilidad que más fielmente represente un flujo vehicular específico, es necesario que éste cumpla tres condiciones: primero, cada conductor sitúa su vehículo independientemente de los demás, excepto cuando su espaciamiento es muy pequeño; segundo, para cualquier flujo, el número de vehículos que pasan por un punto en un intervalo de tiempo dado es independiente del número de vehículos que pasan por otro punto durante el mismo intervalo; tercero, el número de vehículos que pasan por un punto dado en un intervalo de tiempo es independiente del número de vehículos que pasan por el mismo punto durante otro intervalo.

Los supuestos anteriores son los que utiliza la *distribución de Poisson*, la cual tiene aplicación para flujos vehiculares bajos y medios.

Suponiendo que la *distribución de llegadas* de los vehículos a un punto es de tipo Poisson, entonces la probabilidad de x llegadas en cualquier intervalo de tiempo t viene dada por la siguiente expresión:

$$p(x) = P(X = x) = \frac{m^x e^{-m}}{x!} \quad para\ x = 0,1,2,\ldots,\infty \tag{10.30}$$

Donde:

X = variable aleatoria que representa el número de llegadas de vehículos a un punto

$p(x)$ = probabilidad que lleguen exactamente x vehículos al punto durante un intervalo de tiempo t

m = número medio de vehículos que se espera lleguen durante el intervalo de tiempo t (vehículos/intervalo)

e = base de los logaritmos Neperianos = 2.718282

El valor de m en función de la tasa de flujo de llegadas q es:

$$m = qt \tag{10.31}$$

Por lo tanto, la distribución de Poisson también se puede escribir como:

$$p(x)=P(X=x)=\frac{(qt)^x e^{-qt}}{x!} \tag{10.32}$$

Ahora, la probabilidad que no lleguen vehículos durante el intervalo de tiempo t, según la expresión anterior es:

$$p(0)=P(X=0)=\frac{(qt)^0 e^{-qt}}{0!}$$

$$=e^{-qt} \quad para\ t \geq 0$$

Si no llegan vehículos durante el intervalo de tiempo t, entonces existe un intervalo de tiempo h entre vehículos de *al menos* t. Esto quiere decir que el intervalo h es *igual o mayor que* t. Esta característica define la *distribución de intervalos* de tiempo entre vehículos, la cual se expresa como:

$$P(h \geq t)=e^{-qt} \quad para\ t \geq 0 \tag{10.33}$$

La anterior expresión indica que la distribución de intervalos entre vehículos es una variable continua de tipo exponencial negativa.

La distribución discreta de llegadas, ecuación (10.32), y la distribución continua de intervalos, ecuación (10.33), tienen varias aplicaciones: control de intersecciones, cálculo de longitudes de almacenamiento en carriles de vuelta izquierda, estimación de filas y demoras del tránsito, disponibilidad de claros o separaciones entre vehículos de una corriente principal que permita el cruce de los vehículos de una corriente secundaria, estudio de maniobras de convergencia de corrientes vehiculares, predicción de llegadas de vehículos a puntos de interés, etc.

Por el complemento de la ecuación (10.33), la probabilidad que un intervalo h sea *menor que* t es:

$$P(h<t)=1-P(h \geq t)$$

$$P(h<t)=1-e^{-qt} \quad para\ t \geq 0 \tag{10.34}$$

Una manera fácil de calcular las probabilidades, según la distribución de Poisson, se logra utilizando la siguiente propiedad:

$$p(x+1)=\frac{m}{x+1}p(x) \tag{10.35}$$

Que también se puede escribir como:

$$p(x)=\frac{m}{x}p(x-1) \tag{10.36}$$

En la tabla 10.4 y en la figura 10.16, se ilustra la distribución de llegadas de vehículos según Poisson para varios valores de m, dada por la ecuación (10.30). Obsérvese que

para valores pequeños de m la distribución es altamente sesgada, en tanto que a medida que m aumenta la distribución se hace más simétrica.

El cálculo de las probabilidades se realiza utilizando las ecuaciones (10.30) y (10.35), que para el caso de $m = 1$ se tiene:

$$p(0) = P(X = 0) = \frac{m^x e^{-m}}{x!} = \frac{1^0 e^{-1}}{0!} = 0.368$$

$$p(1) = \frac{m}{x+1} p(x) = \frac{1}{1} p(0) = \frac{1}{1}(0.368) = 0.368$$

$$p(2) = \frac{1}{2} p(1) = \frac{1}{2}(0.368) = 0.184$$

$$p(3) = \frac{1}{3} p(2) = \frac{1}{3}(0.184) = 0.061$$

$$p(4) = \frac{1}{4} p(3) = \frac{1}{4}(0.061) = 0.015$$

$$p(5) = \frac{1}{5} p(4) = \frac{1}{5}(0.015) = 0.003$$

$$p(6) = \frac{1}{6} p(5) = \frac{1}{6}(0.003) = 0.001$$

$$p(7) = \frac{1}{7} p(6) = \frac{1}{7}(0.001) = 0.000$$

Tabla 10.4 Distribución de llegadas de vehículos de acuerdo a la distribución de Poisson

Número de vehículos que llegan	Probabilidad de x llegadas de vehículos $p(x)$			
x	$m=1$	$m=2$	$m=5$	$m=10$
0	0.368	0.135	0.007	0.000
1	0.368	0.271	0.034	0.000
2	0.184	0.271	0.084	0.002
3	0.061	0.180	0.140	0.008
4	0.015	0.090	0.175	0.019
5	0.003	0.036	0.175	0.038
6	0.000	0.012	0.146	0.063
7	0.000	0.003	0.104	0.090
8	0.000	0.001	0.065	0.113
9	0.000	0.000	0.036	0.125
10	0.000	0.000	0.018	0.125
11	0.000	0.000	0.008	0.114
12	0.000	0.000	0.003	0.095
13	0.000	0.000	0.001	0.073
14	0.000	0.000	0.000	0.052
15	0.000	0.000	0.000	0.035

Figura 10.16 *Distribución de llegadas de vehículos de acuerdo a la distribución de Poisson*

Como se demostró anteriormente, la distribución de intervalos entre vehículos ($h \geq t$), dada por la ecuación (10.33), es una función continua, ya que el valor de t es desde cero hasta infinito. Lo mismo sucede con su complemento ($h < t$), ecuación (10.34), conocida como probabilidad acumulativa *menor que*. La figura 10.17 muestra estas dos distribuciones para el caso en el cual $q = 2$, donde:

$$P(h \geq t) = e^{-qt} = e^{-2t}$$

$$p(h < t) = 1 - e^{-qt} = 1 - e^{-2t}$$

Así, para varios valores de t, se tienen las siguientes probabilidades:

Para $t = 0$:

$$P(h \geq 0) = e^{-2(0)} = 1.000$$

$$P(h < 0) = 1 - e^{-2(0)} = 0.000$$

Para $t = 1$:

$$P(h \geq 1) = e^{-2(1)} = 0.135$$

$$P(h < 1) = 1 - e^{-2(1)} = 0.865$$

Figura 10.17 *Distribución exponencial de intervalos entre vehículos*

Para $t = 2$:

$$P(h \geq 2) = e^{-2(2)} = 0.018$$

$$P(h < 2) = 1 - e^{-2(2)} = 0.982$$

Para $t = 3$:

$$P(h \geq 3) = e^{-2(3)} = 0.002$$

$$P(h < 3) = 1 - e^{-2(3)} = 0.998$$

Otra de las aplicaciones de las funciones continuas anteriores, consiste en determinar la probabilidad de tener un intervalo h entre vehículos dentro de un intervalo de t_1 a t_2, siendo $t_1 < t_2$, lo cual se puede plantear de la siguiente manera:

$$P(t_1 < h < t_2) = P(h < t_2) - P(h < t_1)$$
$$= \left(1 - e^{-qt_2}\right) - \left(1 - e^{-qt_1}\right)$$
$$P(t_1 < h < t_2) = e^{-qt_1} - e^{-qt_2} \quad para \;\; t_1, t_2 \geq 0 \tag{10.37}$$

También, es importante tener en cuenta otras propiedades de la distribución acumulada de Poisson, las cuales se expresan como sigue:

1. Probabilidad que lleguen N *o menos* vehículos:

$$P(X \leq N) = p(0) + p(1) + p(2) + \ldots + p(N)$$
$$P(X \leq N) = \sum_{x=0}^{N} p(x) = \sum_{x=0}^{N} \left(\frac{m^x e^{-m}}{x!} \right) \tag{10.38}$$

2. Probabilidad que lleguen *más de* N vehículos:

$$P(X > N) = 1 - P(X \leq N)$$
$$P(X > N) = 1 - \sum_{x=0}^{N} \left(\frac{m^x e^{-m}}{x!} \right) \tag{10.39}$$

3. Probabilidad que lleguen *menos de* N vehículos:

$$P(X < N) = p(0) + p(1) + p(2) + \ldots + p(N-1) = P(X < N-1)$$
$$P(X < N) = \sum_{x=0}^{N-1} \left(\frac{m^x e^{-m}}{x!} \right) \tag{10.40}$$

4. Probabilidad que lleguen N *o más* vehículos:

$$P(X \geq N) = 1 - P(X < N)$$
$$P(X \geq N) = 1 - \sum_{x=0}^{N-1} \left(\frac{m^x e^{-m}}{x!} \right) \tag{10.41}$$

Ejemplo 10.10

Sobre uno de los accesos de una determinada intersección sin semáforo, en promedio 5 vehículos por hora dan vuelta a izquierda. Se desea determinar la probabilidad que en una hora específica: exactamente 5 den vuelta; exactamente 3 den vuelta; a lo máximo 3 den vuelta; más de 3 den vuelta; menos de 3 den vuelta y por lo menos 3 den vuelta.

En este caso el valor de m es de:

$m = 5$ *vueltas durante 1 hora*

Exactamente 5 den vuelta:

Suponiendo que los vehículos llegan a la intersección y dan vuelta siguiendo la distribución de Poisson, según la ecuación (10.30):

$$p(5) = P(X = 5) = \frac{5^5 e^{-5}}{5!} = 0.175$$

Exactamente 3 den vuelta: ecuación (10.30)

$$p(3) = P(X = 3) = \frac{5^3 e^{-5}}{3!} = 0.140$$

A lo máximo 3 den vuelta: ecuación (10.38)

$$P(X \leq 3) = \sum_{x=0}^{3} \left(\frac{5^x e^{-5}}{x!} \right)$$

$$P(X \leq 3) = \frac{5^0 e^{-5}}{0!} + \frac{5^1 e^{-5}}{1!} + \frac{5^2 e^{-5}}{2!} + \frac{5^3 e^{-5}}{3!} = 0.265$$

Más de 3 den vuelta: ecuación (10.39)

$$P(X > 3) = 1 - \sum_{x=0}^{3} \left(\frac{5^x e^{-5}}{x!} \right)$$

$$P(X > 3) = 1 - 0.265 = 0.735$$

Menos de 3 den vuelta: ecuación (10.40)

$$P(X < 3) = \sum_{x=0}^{3-1} \left(\frac{5^x e^{-5}}{x!} \right) = 0.125$$

Por lo menos de 3 den vuelta: ecuación (10.41)

$$P(X \geq 3) = 1 - \sum_{x=0}^{2} \left(\frac{5^x e^{-5}}{x!} \right) = 0.875$$

Ejemplo 10.11

Una carretera, donde se supone que los vehículos están distribuidos en forma casual según la distribución de Poisson, tiene un flujo medio de 342 vehículos por hora. Se desea conocer la probabilidad de tener un intervalo entre vehículos menor de 8 segundos y determinar el porcentaje de los intervalos entre vehículos que estén entre 10 y 20 segundos.

Intervalo menor de 8 segundos: $P(h < 8\,s)$

La tasa media de flujo q es:

$$q = 342\,veh/h$$

El intervalo de tiempo t de referencia es de 8 segundos, esto es:

$$t = 8\,s/intervalo$$

El número medio m de vehículos que se espera lleguen durante los 8 segundos, de acuerdo a la ecuación (10.31), es:

$$m = qt = (342\,veh/h)(8\,s/intervalo)\left(\frac{1\,h}{3{,}600\,s}\right)$$

$$= 0.76\,veh/intervalo$$

Por lo tanto la probabilidad de tener un intervalo entre vehículos menor de 8 segundos, utilizando la ecuación (10.34), es:

$$P(h < 8\,s) = 1 - e^{-qt} = 1 - e^{-0.76} = 0.532$$

Porcentaje de intervalos entre 10 y 20 segundos: $P(10\,s < h < 20\,s)$

Los valores de t_1, t_2, qt_1 y qt_2 son:

$$t_1 = 10\,s/intervalo \qquad t_2 = 20\,s/intervalo$$

$$qt_1 = 342(10)\left(\frac{1}{3{,}600}\right) = 0.95$$

$$qt_2 = 342(20)\left(\frac{1}{3{,}600}\right) = 1.90$$

Luego, de acuerdo a la ecuación (10.37):

$$P(10\,s < h < 20\,s) = e^{-qt_1} - e^{-qt_2} = e^{-0.95} - e^{-1.90} = 0.237$$

Lo que indica que el 23.7% de todos los intervalos entre los vehículos están entre 10 y 20 segundos.

Ejemplo 10.12

Una de las aplicaciones de la distribución acumulativa de Poisson es el proy de carriles de vuelta hacia la izquierda. Un criterio utilizado consiste en proyectar carriles de tal manera que el número de vehículos que deseen voltear hacia la izquie excedan la capacidad de almacenamiento del carril únicamente el 5% del tiempo dura un ciclo determinado. Para 160 vehículos que den vuelta hacia la izquierda en un c de 80 segundos, calcular la longitud necesaria de almacenamiento del carril espe de vuelta hacia la izquierda.

Sea N la capacidad de almacenamiento o longitud requerida del carril en núme de vehículos. Exceder la capacidad de almacenamiento del carril en el 5% del tiemp significa que la probabilidad de llegada a dicho carril, durante un ciclo, de más de vehículos es del 0.05. Esto, según la ecuación (10.39), se expresa así:

$$P(X > N) = 1 - \sum_{x=0}^{N} \left(\frac{m^x e^{-m}}{x!} \right) = 0.05$$

Para la cual, $m = qt$, donde:

$t = 80\ s/ciclo \quad q = 160\ veh/h$

$$m = qt = (160\ veh/h)(80\ s/ciclo)\left(\frac{1\ h}{3{,}600\ s}\right)$$

$$= 3.56\ veh/ciclo$$

Por lo tanto:

$$P(X > N) = 1 - \sum_{x=0}^{N} \left(\frac{3.56^x e^{-3.56}}{x!} \right)$$

$$= 0.05$$

Que es lo mismo que:

$$\sum_{x=0}^{N} \left(\frac{3.56^x e^{-3.56}}{x!} \right) = 0.95$$

Esta relación puede ser calculada para N, acumulando términos en el miembro de la izquierda hasta que se satisfaga la ecuación para sucesivos valores de N, tal como lo muestra la tabla 10.5. En esta tabla se observa que el valor de 0.95 está entre $N = 6$ y $N = 7$. Tomando este último valor, se concluye que la capacidad o longitud del carril debe ser tal que permita almacenar por lo menos 7 vehículos.

Tabla 10.5 Distribución acumulativa de Poisson

N (Número de vehículos)	$\sum_{x=0}^{N}\left(\frac{3.56^{x}e^{-3.56}}{x!}\right)$
0	0.028
1	0.130
2	0.310
3	0.524
4	0.714
5	0.850
6	0.930
7	0.971

Si se considera de 5.00 metros la longitud promedio de los vehículos, con una eparación entre ellos de 0.80 metros cuando esperan dar vuelta hacia la izquierda, la ongitud del carril debe ser de al menos:

$$7(5.00)+6(0.80)=39.80\ m$$

Ejemplo 10.13

Los vehículos que circulan por un enlace de entrada a una autopista, necesitan nínimo un claro o brecha de 4 segundos en la corriente principal para incorporarse. i el flujo medio sobre la autopista es de 1,600 vehículos por hora, distribuidos de acuerdo la distribución de Poisson, determinar el número de claros o brechas disponibles.

Se trata de calcular la probabilidad de tener un intervalo h en la corriente principal le al menos 4 segundos. Por lo que:

$$t = 4\ s/intervalo \qquad q = 1{,}600\ veh/h$$

$$qt = (1{,}600\ veh/h)(4\ s/intervalo)\left(\frac{1\ h}{3{,}600\ s}\right)$$

$$= 1.78\ veh/intervalo$$

Ahora, de acuerdo a la ecuación (10.33), la probabilidad es:

$$P(h \geq 4\ s) = e^{-qt} = e^{-1.78} = 0.169$$

Por lo tanto, el número de claros o brechas disponibles en una hora es:

$$(1{,}600-1)(0.169)=270$$

10.5 Problemas propuestos

10.1 En un punto de una vialidad durante 5 minutos se contaron 21 vehículos, los cuales circulaban con las siguientes velocidades instantáneas:

a. 8 vehículos con 60 km/h
b. 9 vehículos con 70 km/h
c. 4 vehículos con 80 km/h

Calcule: 1) La tasa de flujo. 2) El intervalo promedio. 3) La velocidad media espacial. 4) La densidad. 5) El espaciamiento promedio.

10.2 Con cronómetros sincronizados a la misma hora en las secciones transversales $A-A$ y $B-B$ de la figura 10.18 se muestrearon 5 vehículos consecutivos, los cuales pasaron por las respectivas secciones a las horas mostradas en la tabla 10.6. 1) Calcular $\overline{v}_t, \overline{v}_e$ y S_t. 2) Estimar la tasa de flujo. 3) ¿Cuántos vehículos por kilómetro caracterizan esta corriente vehicular? 4) ¿Cómo es el nivel de operación de esta corriente vehicular?

Figura 10.18 Flujos vehiculares, problema 10.2

Tabla 10.6 Flujos vehiculares, problema 10.2

Vehículo #	Hora al paso por *A-A*	Hora al paso por *B-B*
1	08:00:00	08:00:30
2	08:00:13	08:00:50
3	08:00:45	08:01:02
4	08:01:10	08:01:24
5	08:01:28	08:02:00

10.3 En una sección de 100 metros de longitud, en un instante dado, se encuentran distribuidos 4 vehículos como se ilustra en la figura 10.19, viajando a las velocidades constantes que allí se indican. Estime la densidad y la tasa de flujo.

Figura 10.19 Distribución longitudinal de vehículos, problema 10.3

10.4 A lo largo de un carril de una autopista un grupo de 12 vehículos consecutivos se encuentran distribuidos longitudinalmente viajando a las velocidades e intervalos entre ellos, como lo muestra la tabla 10.7. Determinar: 1) La tasa media de flujo. 2) Las velocidades media temporal y espacial. 3) ¿Cuántos kilómetros de autopista ocupa esta columna de vehículos?

Tabla 10.7 Velocidades e intervalos entre vehículos, problema 10.4

Vehículo *i*	Velocidad (km/h)	Intervalo entre el vehículo *i* y *i+1* (s)
1	70	
2	75	18.2
3	68	17.8
4	80	21.4
5	78	14.5
6	75	15.4
7	68	12.8
8	72	11.6
9	84	12.7
10	79	13.2
11	81	12.1
12	87	13.1

10.5 Un tramo de carretera tiene una velocidad a flujo libre de 90 km/h y una densidad de congestionamiento de 160 veh/km. Utilizando el modelo lineal, determine: 1) La capacidad. 2) Las densidades y velocidades correspondientes a un flujo de demanda de 800 veh/h.

10.6 La relación entre la velocidad y la densidad de una corriente vehicular está dada por la siguiente expresión:

$$\bar{v}_e = 52 - 0.32k$$

Donde $\bar{v}_e$ es la velocidad media espacial en km/h y k es la densidad en veh/km. Determine: 1) El flujo máximo. 2) El intervalo promedio a flujo máximo. 3) El espaciamiento promedio a congestión.

10.7 La figura 10.20 ilustra cuatro tipos de vehículos. 1) Para la situación mostrada, calcule: a. La velocidad media espacial. b. La velocidad media temporal. c. La densidad. 2) Se realizó un conteo en la sección transversal

AA durante 30 minutos, arrojando los siguientes vehículos: 30 veces del tipo A, 10 veces del tipo B, 40 veces del tipo C y 20 veces del tipo D. En estas condiciones, determine: a. La velocidad media temporal. b. La velocidad media espacial. c. La densidad. 3) Si este flujo se ajusta al modelo lineal, según: $q = 100v - 0.8v^2$, para q en veh/h y v en km/h, ¿cuál es la capacidad?

Figura 10.20 *Distribución longitudinal de vehículos, problema 10.7*

10.8 La relación entre la tasa de flujo q (autos/h/carril) y la velocidad v (km/h) de una corriente vehicular de comportamiento lineal es: $q = 72v - 0.86v^2$. 1) Calcule la capacidad. 2) Determine la relación volumen a capacidad para una densidad de 20 autos/km/carril. 3) Para una tasa de flujo de 500 autos/h/carril en condiciones de flujo estable, realice una estimación de la velocidad del tránsito mixto (autos+autobuses+camiones), si la corriente vehicular posee el 8% de vehículos pesados (autobuses+camiones). Use un equivalente de pesados igual a 2.0.

10.9 El modelo lineal de una corriente vehicular arroja la siguiente expresión:

$$q = -0.6k^2 + 70k$$

Donde k está dado en veh/km/carril y q en veh/h/carril. 1) Calcule la capacidad del carril. 2) Para una tasa de flujo de 500 veh/h/carril, calcule las velocidades y comente acerca de la operación vehicular de este flujo. 3) Determine las tres ecuaciones del flujo vehicular y dibújelas.

10.10 Una carretera rural, bajo diferentes condiciones de tránsito, presenta los datos de velocidad media espacial $\bar{v}_e$ (km/h) y densidad k (veh/km/carril) dados en la tabla 10.8. 1) Determine la capacidad de esta carretera; utilice regresión lineal entre la velocidad y la densidad. 2) ¿Cómo es la correlación? 3) Dibuje el diagrama fundamental correspondiente.

10.11 Para los datos de la tabla 10.8: 1) Realice el ajuste logarítmico, planteando las ecuaciones del flujo vehicular. 2) ¿Cómo es la correlación? 3) Dibuje el diagrama fundamental. 4) Determine la capacidad.

10.12 Una corriente de tránsito en condiciones de flujo no congestionado, presenta los datos de velocidad media espacial $\bar{v}_e$ (km/h) y densidad k (veh/km/carril) dados en la tabla 10.9. 1) Realice la regresión exponencial

entre la velocidad y la densidad, determinando las ecuaciones del flujo vehicular. 2) ¿Cómo es la correlación? 3) Dibuje el diagrama fundamental. 4) Calcule la capacidad.

Tabla 10.8 Datos de velocidad-densidad en una carretera rural, problema 10.10

$\bar{v}_e$ (km/h)	k (veh/km/carril)	$\bar{v}_e$ (km/h)	k (veh/km/carril)
85	13	44	40
77	17	33	44
72	22	28	47
64	28	23	51
60	33	21	56
56	36	18	63
55	38	13	72

Tabla 10.9 Datos de velocidad-densidad para flujos no congestionados, problema 10.12

$\bar{v}_e$	77	63	58	57	48	42	33	36	37	29	25
k	4	9	13	20	27	32	49	50	56	58	60

10.13 Durante una hora típica en un punto de una vialidad pasan, cada 15 minutos, 40, 50, 20 y 10 vehículos, respectivamente. Para un intervalo de tiempo de 15 minutos, cuál es la probabilidad de llegada al punto de: 1) Exactamente 10, 20, 40 y 50 vehículos, respectivamente. 2) Más de 30 vehículos. 3) A lo máximo 20 vehículos. Suponga que los vehículos llegan según la distribución de Poisson.

10.14 Un punto de una carretera tiene un flujo medio de 150 vehículos cada 30 minutos. Calcule: 1) La probabilidad de llegada al punto de exactamente 4 vehículos durante un intervalo de 20 segundos. 2) La probabilidad de tener un intervalo entre vehículos, menor que el intervalo promedio.

10.15 La figura 10.21 muestra esquemáticamente un enlace de convergencia a una autopista. Los vehículos del enlace necesitan disponer, al menos, de un intervalo de 5 segundos en la corriente principal para poder incorporarse sin problema. ¿Cuántos vehículos por hora sobre el enlace deberán "verdaderamente" ceder el paso y, en última instancia, hasta "parar"?

Figura 10.21 *Claros disponibles en un enlace de convergencia, problema 10.15*

FUNDAMENTOS Y APLICACIONES

10.16 La figura 10.22 muestra cuatro tipos de vehículos, A, B, C, y D, distribuidos en una distancia de un kilómetro antes del acceso a una intersección. 1) Para la situación dada en el esquema, calcule la velocidad media temporal, la velocidad media espacial y la densidad. 2) Al realizar un aforo en la sección transversal $1-1$, durante 30 minutos se contaron los siguientes vehículos: 20 del tipo A, 40 del tipo B, 10 del tipo C y 30 del tipo D. En estas condiciones, calcule la velocidad media temporal, la velocidad media espacial y la densidad. 3) Si un vehículo de la calle secundaria, después de efectuar el "alto", necesita por lo menos 6 segundos para cruzar la calle principal, calcule la probabilidad que tiene de realizar el cruce suponiendo que dispone de suficiente visibilidad para hacerlo.

Figura 10.22 Distribución vehicular y disponibilidad de cruce, problema 10.16

Referencias bibliográficas

[1] Gerlough, Daniel L. and Huber, Matthew J. *Traffic Flow Theory*. A Monograph, Special Report 165, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1975.

[2] Greenshields, B.D. A *Study in Highway Capacity*. Highway Research Board, Proceedings, Vol. 14, 1935.

[3] Garber, Nicholas J. and Hoel, Lester A. *Traffic and Highway Engineering*. Third edition, University of Virginia, Brooks/Cole, Thomson Learning, Pacific Grove, California, 2002.

[4] May, Adolf D. *Traffic Flow Fundamentals*. University of California, Berkeley, Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1990.

[5] Greenberg, H. *An Analysis of Traffic Flow*. Operations Research, Vol. 7, 1959.

[6] Underwood, R.T. *Speed, Volume, and Density Relationships, Quality and Theory of Traffic Flow*. Yale Bureau of Highway Traffic, New Haven, Conn., 1961.

[7] Drake J.S., Schofer J.L. and May A.D. *A Statistical Analysis of Speed Density Hypotheses*. Third International Symposium on the Theory of Traffic Flow Proceedings, Elsevier North Holand, Inc., New York, 1967.

[8] Pipes, L.A. *Car-following Models and the Fundamental Diagram of Road Traffic*. Transportation Research, Vol. 1, No. 1, 1967.

[9] Munjal, P.K. and Pipes, L.A. *Propagation of On-ramp Density Perturbations on Unidirectional and Two and Three Lane Freeways*. Transportation Research, Vol. 5, No. 4, 1971.

[10] Drew, Donald R. *Traffic Flow Theory and Control*. McGraw-Hill Series in Transportation, New York, 1968.

[11] Wohl, Martin and Martin Brian, V. *Traffic System Analysis for Engineers and Planners*. McGraw-Hill Series in Transportation, 1967.

11

Análisis de la congestión

11.1 Generalidades

Uno de los objetivos fundamentales de los ingenieros de tránsito y transporte, es el de planear, diseñar y operar los sistemas viales de manera eficiente, tal que las demoras inducidas a los usuarios sean mínimas.

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

Las *demoras* pueden causarlas los dispositivos para el control del tránsito al interrumpir el flujo y las ocasionadas por la misma corriente vehicular en situaciones de flujo continuo. En el primer caso, todos los tipos de semáforos, así como las señales de ALTO y CEDA EL PASO producen detenciones en un viaje normal. En el segundo caso, se tienen demoras periódicas que ocurren corriente arriba de "cuellos de botella" durante las mismas horas del día, y las demoras no periódicas producto de incidentes (accidentes o vehículos descompuestos) o cierres eventuales de un carril o una calzada.

La influencia de todas estas demoras puede medirse como una relación de demora, que consiste en la diferencia entre la relación del movimiento observado y la relación del movimiento considerada como normal para diferentes tipos de vías urbanas. Los valores mínimos para la relación del movimiento normal en términos de velocidad de recorrido son: para autopistas de acceso controlado 56 km/h, para arterias principales 40 km/h y para calles secundarias 32 km/h.

Con estos datos se puede conocer, comparativamente, cuáles son las calles de la ciudad que están en condiciones más críticas. También se pueden comparar las calles de una ciudad con otra, conociendo alguna calle que opere en condiciones ideales, para así establecer la comparación con las otras que se hayan medido y saber el grado de congestionamiento en que se encuentran.

Los capítulos 7, 8 y 12 del Manual de Estudios de Ingeniería de Tránsito [1], lo mismo que el capítulo 5 del Tomo III y IV del Manual de Planeación y Diseño para la Administración del Tránsito y Transporte de Bogotá D.C. [2], presentan en forma detallada los diversos métodos para llevar a cabo estudios de demoras a lo largo de

rutas, en intersecciones y en vehículos de transporte público.

Las demoras y las colas, resultado del congestionamiento, es un *fenómeno de espera* comúnmente asociado a muchos problemas de tránsito.

La *teoría de colas*, mediante el uso de algoritmos y modelos matemáticos, es una herramienta importante para el análisis de este fenómeno. En general, las situaciones de demoras y colas las ocasiona la variabilidad del flujo de tránsito, pues hay periodos en que la demanda puede llegar a ser muy grande, o se presentan porque la capacidad del sistema varíe con el tiempo al darse el servicio por períodos.

11.2 Significado analítico de la congestión

En general la *capacidad* de un sistema es el número máximo de entidades que pueden ser procesados por unidad de tiempo. De allí que, la congestión ocurre porque el sistema tiene una capacidad limitada y porque la demanda colocada y el proceso mismo tienen un carácter aleatorio [3].

Considérese un sistema con una capacidad de μ entidades por unidad de tiempo, conocida también como tasa de servicio. Como se vio en el Capitulo 10, la capacidad es la tasa máxima y su inverso es el intervalo máximo; entonces, puede decirse que cada entidad consume un tiempo promedio t_P en ser procesado (servido) de:

$$t_P = \frac{1}{\mu} \tag{11.1}$$

Si las entidades llegan a una tasa λ por unidad de tiempo, entonces el tiempo total de procesamiento t_T por entidad será de:

$$t_T = \begin{cases} t_P, & para \ \lambda \leq \mu \\ \infty, & para \ \lambda > \mu \end{cases} \tag{11.2}$$

Esto se ilustra en la parte a) de la figura 11.1.

Si $\lambda > \mu$, puede ocurrir que: (1) el sistema colapse, esto es, que exista una completa congestión tal que no se procesen unidades ($t_T = \infty$); (2) se forme una cola de espera que crece cada vez más ($t_P \to \infty$); o (3) bajo condiciones de estado no estacionarias, solamente cuando $\lambda > \mu$ por un intervalo limitado de tiempo, la cola que se forma eventualmente se disipa [3].

Por otra parte, si λ y/o μ son variables aleatorias, incluso cuando $\lambda < \mu$, las colas se pueden formar.

Por lo anterior, en cualquier condición de estado (estacionario o no), el tiempo total de procesamiento t_T, por unidad, es igual al tiempo promedio de procesamiento t_P más el tiempo de demora t_D. Esto es:

$$t_T = t_P + t_D \tag{11.3}$$

Figura 11.1 Significado de la congestión

El significado práctico de la congestión se ilustra en la parte b) de la figura 11.1, cuya explicación analítica es la siguiente:

Para el rango de llegadas, $0 < \lambda < \lambda_1$, *no hay congestión,* $t_T = t_P$, ya que $t_D = 0$.

Para $\lambda > \lambda_1$, *existe congestión* puesto que $t_D > 0$, o lo que es lo mismo $t_T > t_P$. Si λ se incrementa hasta que se aproxime a μ, las demoras t_D se incrementarán aún más.

Para cualquier nivel de demanda λ mayor que la capacidad μ, $\lambda > \mu$, la cola crecerá infinitamente si el nivel de demanda permanece constante. Si λ varía, entonces la cola empezará a disiparse, siempre y cuando λ caiga por debajo de μ.

11.3 Elementos de un sistema de filas de espera

De aquí en adelante, se usará indistintamente el término *cola*, *fila* o *línea de espera*. Para caracterizar un fenómeno de espera en un sistema vial de servicios, es necesario responder a interrogantes tales como:

- ¿A qué hora empieza y termina el congestionamiento?
- ¿Cuál es el número medio de vehículos en el sistema?

- ¿Cuál es el número medio de vehículos en la cola?
- ¿Cuál es el tiempo medio en el sistema?
- ¿Cuál es el tiempo medio de espera o demora media?
- ¿Cuál es la longitud máxima de cola?
- ¿Cuál es la demora máxima?
- ¿Cuál es la demora total de todo el tránsito?
- ¿Cuál es la proporción de tiempo en que se utiliza el sistema?
- ¿Cuál es la proporción de tiempo cuando el sistema permanece inactivo?

Se genera una cola cuando los usuarios (vehículos) llegan a una estación de servicio cualquiera, ya sea, por ejemplo, un estacionamiento, una intersección con semáforos o no, un "cuello de botella", un enlace de entrada a una autopista, un carril especial de vuelta, etc. La prestación del servicio para cada llegada toma cierto tiempo y puede ofrecerlo una o más estaciones. En la figura 11.2 se muestran esquemáticamente diversos sistemas de filas de espera.

Figura 11.2 Sistemas de filas de espera

Los vehículos *llegan* al sistema a una *tasa de llegadas* λ. Entran a la estación de servicio si está desocupada, donde son atendidos a una *tasa media de servicio* μ, equivalente a la tasa de *salidas*. Si la estación de servicio está ocupada se forman en la *cola* a esperar ser atendidos.

Frecuentemente, tanto la tasa de llegadas como la tasa de servicios varían, causando que también varíe la formación de colas. Se define la *cola* como el número de vehículos que esperan ser servidos, sin incluir aquellos que actualmente están siendo atendidos.

Para considerar de una manera apropiada un sistema de filas de espera se requiere tener en cuenta la naturaleza de su comportamiento, puesto que tanto las llegadas como los servicios varían con el tiempo. En este sentido, el comportamiento de la cola y los modelos necesarios para describirla, o caracterizarla, dependen de la representación explícita de los siguientes elementos que conforman el proceso:

1. *Las llegadas (demanda) o características de entrada:*

Las llegadas pueden ser expresadas en términos de tasas de flujo (vehículos/hora) o intervalos de tiempo (segundos/vehículo). Su distribución puede ser de tipo *determinístico* o *probabilístico*.

2. *Los servicios (capacidad) o características de salida:*

También pueden ser expresados como tasas de flujo o intervalos. Su distribución también puede ser de tipo determinístico o probabilístico.

3. *El procedimiento de servicio o disciplina de la cola:*

En la mayoría de los sistemas viales el procedimiento de servicios consiste en que el primero que llega es el primero que sale.

El *régimen* que define las características de un fenómeno de espera se denota por tres valores alfanuméricos representados de la siguiente manera:

$a/b/c$

Donde:

a = identifica el tipo de llegadas

b = identifica el tipo de servicios o salidas

c = identifica el número de estaciones de servicio

Así por ejemplo, un fenómeno de espera con un régimen $D/D/1$ supone *llegadas* y *salidas* de tipo *determinístico* o a intervalos uniformes con *una* estación de servicio. Por otra parte, un régimen $M/M/1$ supone *llegadas* y *salidas* de tipo *probabilístico* (se simboliza con la letra M pues se asume que el proceso es del tipo de modelo de Markov) o distribuidas exponencialmente con *una* estación de servicio.

11.4 Análisis determinístico del congestionamiento

Tal como se mencionó en el Capítulo 10, el *análisis determinístico* consiste en el cálculo preciso del valor de una variable en función de ciertos valores específicos que toman otras variables. Esto es, solamente ocurrirá *un valor* de la *función objetivo* para un conjunto dado de valores de las *variables de entrada*.

En situaciones de congestionamiento, donde los patrones de llegada y servicios son altos, los enfoques a nivel *macroscópico* son los que más se aproximan a este fenómeno, describiendo la operación vehicular en términos de sus variables de flujo, generalmente tomadas como promedios.

11.4.1 Análisis de intersecciones con semáforos con régimen D/D/1

La intersección con semáforos es uno de los ejemplos más típicos de un fenómeno de espera, puesto que por la presencia de la luz roja siempre existirá la formación de colas de vehículos. Con el propósito de entender de una manera clara y sencilla, en el siguiente ejemplo se describen, gráfica y analíticamente, los diversos elementos que caracterizan este fenómeno, bajo condiciones *no saturadas* del tránsito, esto es, para cada ciclo las llegadas son menores que la *capacidad* del acceso, de manera que los vehículos que se encuentran en la cola no esperan más de un ciclo para ser servidos por el semáforo o estación de servicio [4, 5, 6].

La capacidad de un acceso a una intersección con semáforos se expresa en términos del *flujo de saturación* s. Cuando el semáforo cambia a verde, el paso de los vehículos a través de la línea de ALTO se incrementa rápidamente a una tasa equivalente al flujo de saturación, la cual se mantiene constante hasta que la cola se disipa o hasta que termina el verde. El flujo de saturación es la tasa máxima de salidas que puede ser obtenida cuando existen colas. Este concepto y todos los relacionados con el cálculo de los tiempos de un semáforo son tratados con mayor detalle en los Capítulos 12 y 13.

Ejemplo 11.1

El carril promedio de uno de los accesos de una intersección con semáforos tiene un flujo de saturación de 1,800 vehículos livianos por hora de luz verde. La tasa media de llegadas por carril al acceso es de 900 vehículos livianos por hora, a la cual se le ha asignado un tiempo verde efectivo de 30 segundos en un ciclo de longitud 50 segundos. Se desea realizar el análisis de este acceso a la intersección, tal que permita definir y calcular los diferentes elementos que caracterizan este fenómeno de espera, bajo un régimen *D/D/1*.

Datos de entrada:

La parte a) de la figura 11.3 muestra los datos necesarios para resolver el problema.

Figura 11.3 Fenómeno de espera en una intersección con semáforos

Estos son:

Flujo de saturación (s):

$$s = 1{,}800\ veh/h\left(\frac{1\ h}{3{,}600\ s}\right) = 0.50\ veh/s$$

Tasa media de llegadas (λ):

$$\lambda = 900\ veh/h\left(\frac{1\ h}{3{,}600\ s}\right) = 0.25\ veh/s$$

Longitud del ciclo (C):

$$C = 50\ s$$

Verde efectivo (g):

$$g = 30\ s$$

El *verde efectivo* es el tiempo que efectivamente utilizan los vehículos para cruzar la intersección, el cual incluye el verde propiamente dicho, la pérdida inicial de tiempo y la ganancia al final en el intervalo de despeje.

Obsérvese que la tasa de llegadas λ es uniforme para todo el período de estudio.

La tasa de salidas μ presenta tres estados:

$\mu = 0$, cuando el semáforo muestra la indicación roja.
$\mu = s$, cuando el semáforo muestra la indicación verde y aún existe cola.
$\mu = \lambda$, cuando sin existir cola el semáforo continúa en verde, esto es, los vehículos salen de la intersección a la misma tasa que llegan.

En la parte b) de la figura 11.3 se ha dibujado una gráfica de los vehículos acumulados en función del tiempo t, tal que:

$$Llegadas = Demanda = \lambda t$$

$$Servicio\ máximo = st$$

Con la información anterior se pueden calcular los siguientes indicadores de efectividad:

Tiempo para que se disipe la cola después de empezar el verde efectivo: t_o

$$\lambda(r + t_o) = \mu t_o$$

$$\lambda r + \lambda t_o = \mu t_o$$

$$t_o = \frac{\lambda r}{\mu - \lambda} \qquad (11.4)$$

Si se expresa la tasa de llegadas λ como proporción de la tasa de salidas μ, se obtiene el *factor de utilización* o *intensidad del tránsito* ρ:

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} \tag{11.5}$$

En este caso, $\mu = s$:

$$\rho = \frac{\lambda}{s} = \frac{0.25\ veh/s}{0.50\ veh/s} = 0.50$$

De la ecuación (11.5):

$$\lambda = \mu\rho$$

Reemplazando en la ecuación (11.4):

$$t_o = \frac{\mu\rho r}{\mu - \mu\rho}$$

De donde:

$$t_o = \frac{\rho r}{1-\rho} \tag{11.6}$$

También puede verse que:

$$C = r + g$$

De donde el *rojo efectivo* r es:

$$r = C - g \tag{11.7}$$

$$= 50 - 30 = 20\ s$$

Por lo tanto:

$$t_o = \frac{\rho r}{1-\rho} = \frac{0.50(20)}{1-0.50} = 20\ s$$

<u>*Proporción del ciclo con cola:*</u> P_q

$$P_q = \frac{tiempo\ en\ cola}{longitud\ del\ ciclo}$$

$$P_q = \frac{r + t_o}{C} \tag{11.8}$$

$$= \frac{20 + 20}{50} = 0.80$$

Proporción de vehículos detenidos: P_s

$$P_s = \frac{\text{vehículos detenidos}}{\text{vehículos totales por ciclo}}$$

$$P_s = \frac{\lambda(r+t_o)}{\lambda(r+g)}$$

$$P_s = \frac{r+t_o}{r+g} = \frac{\frac{t_o(1-\rho)}{\rho}+t_o}{C}$$

$$P_s = \frac{t_o}{\rho C} \tag{11.9}$$

$$= \frac{20}{0.50(50)} = 0.80$$

Longitud máxima de la cola: Q_m

Obsérvese que la longitud de la cola (Q) en cualquier instante es igual a la demanda menos el servicio:

$Q = Demanda - Servicio$

La longitud máxima de la cola ocurre al final del rojo, donde el servicio aún es cero, y es igual a:

$$Q_m = \lambda r \tag{11.10}$$

$$= 0.25\ veh/s(20\ s) = 5\ veh$$

Longitud promedio de la cola mientras exista: $\overline{Q}_q$

$$\overline{Q}_q = \frac{Q_m}{2} = \frac{\lambda r}{2} \tag{11.11}$$

$$= \frac{5}{2} = 2.5\ veh$$

Longitud promedio de la cola por ciclo: $\overline{Q}$

$$\overline{Q} = \frac{\left(\frac{\lambda r}{2}\right)r + \left(\frac{\lambda r}{2}\right)t_o}{r+g} = \frac{(r+t_o)\left(\frac{\lambda r}{2}\right)}{r+g}$$

$$\overline{Q} = \frac{r+t_o}{C}\left(\frac{\lambda r}{2}\right) \tag{11.12}$$

$$= \frac{20+20}{50}(2.5) = 2.0\ veh$$

Demora máxima que experimenta un vehículo: d_m

$$d_m = r \tag{11.13}$$

$$= 20\ s$$

Demora total para todo el tránsito por ciclo: D

La demora total para todo el tránsito por ciclo es igual al área del triángulo sombreado de la parte b) de la figura 11.3:

$$D = \frac{r[\lambda(r+t_o)]}{2} = \frac{\lambda r^2 + \lambda r t_o}{2}$$

Reemplazando el valor de t_o dado por la ecuación (11.6), se tiene:

$$D = \frac{\lambda r^2 + \lambda r\left(\frac{\rho r}{1-\rho}\right)}{2}$$

$$D = \frac{\lambda r^2}{2(1-\rho)} \tag{11.14}$$

$$= \frac{0.25(20)^2}{2(1-0.50)} = 100\ s\text{-}veh$$

Demora promedio del tránsito por ciclo: d

Se obtiene dividiendo la demora total por el número de vehículos:

$$d = \frac{D}{\lambda C} = \frac{\frac{\lambda r^2}{2(1-\rho)}}{\lambda C}$$

$$d = \frac{r^2}{2C(1-\rho)} \tag{11.15}$$

$$= \frac{(20)^2}{2(50)(1-0.50)} = 8\ s/veh$$

11.4.2 Análisis de cuellos de botella

El análisis que se presenta en esta sección se realiza a nivel determinístico y macroscópico, considerando que los patrones de llegadas y servicios de vehículos son continuos.

En vialidades de flujo continuo, los *cuellos de botella* se presentan básicamente en aquellos tramos donde la sección transversal reduce su ancho en términos del número de carriles. En aquellas situaciones donde la demanda vehicular λ (llegadas) al inicio del cuello de botella supera la capacidad μ (salidas) de éste, se presentan problemas de congestionamiento justamente en el tramo anterior al cuello de botella.

Al igual que en el modelo anterior, el análisis de este fenómeno de espera se efectúa a través de un ejemplo, presentando en forma gráfica y analítica los datos necesarios y los indicadores de efectividad más importantes que lo caracterizan. También, con el propósito de realizar el análisis de una manera más real, se toma un patrón de llegadas λ variable y un patrón de servicios μ constante a capacidad durante todo el tiempo que dura el congestionamiento.

Ejemplo 11.2

La parte a) de la figura 11.4 muestra, para una carretera en un sentido, el patrón de demanda vehicular que llega entre las 06:00 y las 10:00 horas a un cuello de botella de capacidad 2,000 vehículos por hora. Se quiere analizar este fenómeno de espera planteando todas las relaciones que lo caracterizan.

Datos de entrada:

Para el período de análisis, las llegadas al cuello de botella empiezan a una tasa $\lambda_1 = 1{,}600\ veh/h$ hasta las 07:00, para el cual $\lambda_1 < \mu$. Durante el período de las 07:00 a las 08:00, la tasa de llegadas se incrementa a $\lambda_2 = 2{,}400\ veh/h$ y, naturalmente, $\lambda_2 > \mu$. Para el período de las 08:00 a las 09:00, la demanda pasa a $\lambda_3 = 2{,}200\ veh/h$, pero aún $\lambda_3 > \mu$ Finalmente, entre las 09:00 y las 10:00, la demanda decrece a $\lambda_4 = 1{,}200\ veh/h$, para el cual de nuevo $\lambda_4 < \mu$.

Las tasas de flujo, λ y μ, de la parte a) se convierten a un diagrama de vehículos acumulados en función del tiempo según la parte b), de acuerdo a que:

$$Demanda\ acumulada = \lambda t \tag{11.16}$$

$$Servicio\ acumulado = \mu t \tag{11.17}$$

Número total de vehículos que llegan entre las 06:00 y las 07:00: N_1

$$N_1 = \lambda_1 t_1 \tag{11.18}$$

$$= (1{,}600\ veh/h)(1\ h) = 1{,}600\ veh$$

Figura 11.4 Fenómeno de espera en cuellos de botella

Este número acumulado de vehículos se aprecia en la parte b) o diagrama acumulado. Obsérvese que este valor es igual al área A_1 bajo la función de demanda dada en la parte a).

Esto es:

$$A_1 = \lambda_1 t_1 = N_1$$

Igualmente, en la parte b) se ha representado el número total de vehículos que llegan en los otros períodos, y el total acumulado para las cuatro horas (7,400 veh).

Hora a la cual empieza la congestión:

La congestión empieza justamente cuando las llegadas exceden la capacidad, $\lambda_2 > \mu$, lo que ocurre exactamente a las 07:00 horas.

Duración del congestionamiento: T_q

Durante los períodos t_2 y t_3 las llegadas son mayores que la capacidad, por lo que la cola se disipa durante el período t_4, tal que:

$$T_q = t_2 + t_3 + T_d$$

Por igualdad de áreas, en la parte a), se tiene:

$$(\lambda_2 - \mu)t_2 + (\lambda_3 - \mu)t_3 = (\mu - \lambda_4)T_d$$

$$T_d = \frac{(\lambda_2 - \mu)t_2 + (\lambda_3 - \mu)t_3}{\mu - \lambda_4}$$

Por lo tanto:

$$T_q = t_2 + t_3 + \frac{(\lambda_2 - \mu)\,t_2 + (\lambda_3 - \mu)\,t_3}{\mu - \lambda_4} \tag{11.19}$$

$$= 1 + 1 + \frac{(2{,}400 - 2{,}000)1 + (2{,}200 - 2{,}000)1}{2{,}000 - 1{,}200} = 2.75\,h$$

En otras palabras, la cola se disipa a las 09:45.

Longitud máxima de la cola: Q_m

El máximo número de vehículos en la cola ocurre al final del período t_3, y será aquella demanda acumulada que no es servida durante el período $t_2 + t_3$, la cual, según la parte a), es:

$$Q_m = (\lambda_2 - \mu)t_2 + (\lambda_3 - \mu)t_3 \tag{11.20}$$

$$= (2{,}400 - 2{,}000)1 + (2{,}200 - 2{,}000)1 = 600\,veh$$

La misma ecuación (11.20) también se puede obtener de la parte b), planteando que la longitud de la cola Q en cualquier instante es igual a:

Longitud de la cola = Demanda - Servicio

$$Q = \lambda t - \mu t \tag{11.21}$$

$$Q_m = (\lambda_2 t_2 + \lambda_3 t_3) - \mu(t_2 + t_3)$$
$$= (\lambda_2 - \mu)\, t_2 + (\lambda_3 - \mu)\, t_3$$

Demora máxima que experimenta un vehículo: d_m

Esta demora le ocurre a aquel vehículo que llega al final del período t_3, esto es a las 09:00 horas. Según la parte b) es:

$$d_m = \frac{\lambda_2 t_2 + \lambda_3 t_3}{\mu} - t_2 - t_3$$

$$= \frac{\lambda_2 t_2 + \lambda_3 t_3 - \mu t_2 - \mu t_3}{\mu}$$

$$d_m = \frac{(\lambda_2 - \mu)\, t_2 + (\lambda_3 - \mu) t_3}{\mu} \tag{11.22}$$

$$= \frac{(2{,}400 - 2{,}000)1 + (2{,}200 - 2{,}000)1}{2{,}000} = 0.30\ h = 18\ min$$

Demora total de todo el tránsito: D

Es el área sombreada del diagrama acumulado:

$$D = \frac{(\lambda_2 t_2 - \mu t_2)\, t_2}{2} + \frac{(\lambda_2 t_2 - \mu t_2)\, t_3}{2} + \frac{[(\lambda_2 - \mu)\, t_2 + (\lambda_3 - \mu) t_3]\, t_3}{2} +$$
$$\frac{[(\lambda_2 - \mu)\, t_2 + (\lambda_3 - \mu)\, t_3]\left[\dfrac{(\lambda_2 - \mu)\, t_2 + (\lambda_3 - \mu)\, t_3}{\mu - \lambda_4}\right]}{2}$$

$$D = \frac{(\lambda_2 t_2 - \mu t_2)(t_2 + t_3)}{2} + \tag{11.23}$$
$$\left[\frac{(\lambda_2 - \mu) t_2 + (\lambda_3 - \mu)\, t_3}{2}\right]\left[t_3 + \frac{(\lambda_2 - \mu)\, t_2 + (\lambda_3 - \mu) t_3}{\mu - \lambda_4}\right]$$

$$= \frac{[2{,}400(1) - 2{,}000(1)](1 + 1)}{2} +$$
$$\left[\frac{(2{,}400 - 2{,}000)1 + (2{,}200 - 2{,}000)1}{2}\right]\left[1 + \frac{(2{,}400 - 2{,}000)1 + (2{,}200 - 2{,}000)1}{2{,}000 - 1{,}200}\right]$$

$$= 925\ h\text{-}veh$$

Número de vehículos afectados por el cuello de botella: N_q

$$N_q = \mu(T_q) \tag{11.24}$$
$$= 2{,}000\ veh/h(2.75\ h) = 5{,}500\ veh$$

Demora promedio del tránsito: d

$$d = \frac{D}{N_q} \tag{11.25}$$
$$= \frac{925\ h\text{-}veh}{5{,}500\ veh} = 0.168\ h = 10\ min$$

Longitud promedio de la cola: $\overline{Q}$

$$\overline{Q} = \frac{D}{T_q} \tag{11.26}$$
$$= \frac{925\ h\text{-}veh}{2.75\ h} = 336\ veh$$

11.5 Análisis probabilístico de líneas de espera

Por tratarse de una introducción al análisis probabilístico de líneas, o filas de espera, sólo se presentarán los dos modelos más generales y sencillos de mayor aplicación en problemas de tránsito. Más aún, las relaciones que se muestran son completamente válidas solamente para condiciones de *estado estacionario,* esto es, ellas solamente se aplican cuando los patrones de llegadas y servicios se sostienen por largos períodos [7]. Por lo tanto, este enfoque no se puede aplicar a aquellas situaciones de máxima demanda en las cuales los flujos de llegadas λ exceden la capacidad μ. De allí que, para tener condiciones de flujo en estado estacionario debe cumplirse que $\lambda < \mu$. Es importante aclarar, como se mencionó anteriormente, que aunque las llegadas son menores que las salidas, siempre existe la posibilidad de formación de colas, por el mismo carácter aleatorio del proceso.

11.5.1 Sistema de líneas de espera con una estación de servicio

A continuación se analizará el sistema de líneas de espera con una estación de servicio, llegadas distribuidas de acuerdo a una distribución de Poisson, tiempos de servicio exponenciales y disciplina de servicio "el que llega primero es servido primero".

Como puede verse, este sistema de filas de espera se define bajo el régimen

$M/M/1$, para el cual se han desarrollado una serie de medidas de efectividad que permiten identificarlo. Estas relaciones son los resultados que se observarían después de que el sistema haya estado en operación por un largo tiempo, tal que los promedios y las probabilidades no cambian mientras que éste se mantenga en funcionamiento. Tales medidas de efectividad [5, 7, 8, 9], se ilustran a través del siguiente ejemplo.

Ejemplo 11.3

A una caseta de cobro de una carretera llegan los vehículos a una tasa de 480 vehículos por hora, la cual puede atender un máximo de 520 vehículos por hora. Se quiere determinar las relaciones que caracterizan este fenómeno de espera, si se presta el servicio máximo.

Datos de entrada:

Tasa de llegadas (λ):

$$\lambda = 480\ veh/h\left(\frac{1\,h}{3{,}600\ s}\right) = 0.133\ veh/s$$

Tasa de servicios (μ):

$$\mu = 520\ veh/h\left(\frac{1\,h}{3600\ s}\right) = 0.144\ veh/s$$

Probabilidad de tener exactamente n vehículos en el sistema: $p(n)$

$$p(n) = \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n\left(1-\frac{\lambda}{\mu}\right) \tag{11.27}$$

Tener n vehículos en el sistema, se refiere a aquellos vehículos que están siendo servidos más los que esperan en la cola. Así, por ejemplo, la probabilidad de tener exactamente 12 vehículos en el sistema es:

$$p(12) = \left(\frac{480}{520}\right)^{12}\left(1-\frac{480}{520}\right) = 0.029$$

Número promedio de vehículos en el sistema: $\bar{n}$

$$\bar{n} = \frac{\lambda}{\mu-\lambda} \tag{11.28}$$

$$= \frac{480}{520-480} = 12\ veh$$

De estos 12 vehículos en el sistema, 1 está siendo servido y 11 esperan en la fila.

Longitud promedio de la línea de espera: $\overline{Q}$

$$\overline{Q} = \frac{\lambda^2}{\mu(\mu-\lambda)} \tag{11.29}$$

$$= \frac{(480)^2}{520(520-480)} = 11\,veh$$

Tiempo promedio gastado en el sistema: $\bar{t}_s$

$$\bar{t}_s = \frac{1}{\mu-\lambda} \tag{11.30}$$

$$= \frac{1}{0.144-0.133} = 91\,s/veh$$

Tiempo promedio de espera en la fila: $\bar{t}_q$

$$\bar{t}_q = \frac{\lambda}{\mu(\mu-\lambda)} \tag{11.31}$$

$$= \frac{0.133}{0.144(0.144-0.133)} = 84\,s/veh$$

Porcentaje de utilización del servicio: P

$$P = \frac{\lambda}{\mu}(100) \tag{11.32}$$

$$= \frac{480}{520}(100) = 92.3\,\%$$

Porcentaje de encontrar el sistema inactivo: I

$$I = \left(1-\frac{\lambda}{\mu}\right)(100) \tag{11.33}$$

$$= \left(1-\frac{480}{520}\right)(100) = 7.7\,\%$$

Probabilidad de tener que gastar un tiempo t en el sistema: $p(t)$

$$p(t) = (\mu - \lambda)e^{(\lambda-\mu)t} \tag{11.34}$$

$$= (0.144 - 0.133)e^{(0.133-0.144)t} = 0.011e^{-0.011t}$$

Así, por ejemplo, la probabilidad de gastar 91 segundos en el sistema es:

$$p(91) = 0.011e^{-0.011(91)} = 0.004$$

Probabilidad de tener que gastar un tiempo t o menos en el sistema: $P(t_s \leq t)$

$$P(t_s \leq t) = 1 - e^{-\left(1-\frac{\lambda}{\mu}\right)\mu t} \tag{11.35}$$

$$= 1 - e^{-\left(1-\frac{0.133}{0.144}\right)0.144t} = 1 - e^{-0.011t}$$

La probabilidad de gastar en el sistema 91 segundos o menos es:

$$P(t_s \leq 91\,seg) = 1 - e^{-0.011(91)} = 0.632$$

Probabilidad de tener que esperar un tiempo t o menos en la fila: $P(t_q \leq t)$

$$P(t_q \leq t) = 1 - \frac{\lambda}{\mu}e^{-\left(1-\frac{\lambda}{\mu}\right)\mu t} \tag{11.36}$$

$$= 1 - \frac{0.133}{0.144}e^{-\left(1-\frac{0.133}{0.144}\right)0.144t} = 1 - 0.924e^{-0.011t}$$

La probabilidad de tener que esperar 84 segundos o menos en la fila es:

$$P(t_q \leq 84\,s) = 1 - 0.924e^{-0.011(84)} = 0.633$$

11.5.2 Sistema de líneas de espera con varias estaciones de servicio

Igualmente, en esta sección se estudiará el sistema de líneas de espera con varias estaciones de servicio, llegadas de acuerdo a una distribución Poisson, tiempos de servicio exponenciales y disciplina de servicio "el primer vehículo se mueve hacia la primera estación de servicio vacante".

Al igual que en el modelo anterior, este fenómeno de espera también se define bajo el régimen $M/M/k$, donde k es el número de estaciones de servicio disponibles.

Si la tasa de servicio de la estación k es μ_k, bajo condiciones no saturadas, se debe cumplir que:

$$\lambda < \mu_1 + \mu_2 + ... + \mu_k$$

En muchos problemas reales, las características de todas las estaciones de servicio son las mismas, por lo cual:

$$\mu_1 = \mu_2 = ... = \mu_k = \mu$$

Donde μ representa la tasa de servicio en cada estación. Por lo tanto:

$$\lambda < \mu k$$

Las medidas de efectividad que caracterizan este modelo son mucho más complejas que las del anterior, pero básicamente son del mismo tipo.

Ejemplo 11.4

Un volumen horario de 2,300 vehículos llega a una caseta de cobro compuesta de 4 estaciones de servicio, cada una de las cuales puede atender máximo 600 vehículos por hora. Dicho volumen se distribuye en partes iguales entre las 4 estaciones. Determinar las relaciones que caracterizan este fenómeno de espera.

Datos de entrada:

Número de estaciones de servicio (k):

$$k = 4$$

Tasa de llegadas (λ):

$$\lambda = 2{,}300\ veh/h\left(\frac{1\ h}{3{,}600\ s}\right) = 0.639\ veh/s$$

Tasa de servicios (μ) por estación:

$$\mu = 600\ veh/h\left(\frac{1\ h}{3{,}600\ s}\right) = 0.167\ veh/s$$

Probabilidad de tener cero vehículos en el sistema: $p(0)$

$$p(0) = \frac{1}{\left[\sum_{n=0}^{k-1} \frac{1}{n!}\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n\right] + \frac{1}{k!}\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k\left(\frac{k\mu}{k\mu - \lambda}\right)} \qquad (11.37)$$

$$= \frac{1}{\left[\sum_{n=0}^{4-1} \frac{1}{n!}\left(\frac{2,300}{600}\right)^n\right] + \frac{1}{4!}\left(\frac{2,300}{600}\right)^4 \left[\frac{4(600)}{4(600)-2,300}\right]} = 0.0042$$

Probabilidad de tener exactamente n vehículos en el sistema: $p(n)$

$$p(n) = \frac{1}{n!}\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n p(0) \quad para\ 0 \le n < k \tag{11.38}$$

$$p(1) = \frac{1}{1!}\left(\frac{2,300}{600}\right)^1 (0.0042) = 0.0161$$

$$p(2) = \frac{1}{2!}\left(\frac{2,300}{600}\right)^2 (0.0042) = 0.0309$$

$$p(3) = \frac{1}{3!}\left(\frac{2,300}{600}\right)^3 (0.0042) = 0.0394$$

$$p(n) = \frac{1}{k!\,k^{n-k}}\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n p(0) \quad para\ n \ge k \tag{11.39}$$

$$p(4) = \frac{1}{4!\,4^{4-4}}\left(\frac{2,300}{600}\right)^4 (0.0042) = 0.0378$$

Longitud promedio de la fila: $\overline{Q}$

$$\overline{Q} = \frac{\lambda\mu\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k}{(k-1)!\,(k\mu-\lambda)^2} p(0) \tag{11.40}$$

$$= \frac{2,300(600)\left(\frac{2,300}{600}\right)^4}{(4-1)!\left[4(600)-2,300\right]^2}(0.0042) = 21\,veh$$

Número promedio de vehículos en el sistema: $\overline{n}$

$$\overline{n} = \overline{Q} + \frac{\lambda}{\mu} \tag{11.41}$$

$$= 21 + \frac{2,300}{600} = 25\,veh$$

Tiempo promedio de espera en la fila: $\bar{t}_q$

$$\bar{t}_q = \frac{\mu\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k}{(k-1)!\,(k\mu-\lambda)^2}p(0) \tag{11.42}$$

$$= \frac{0.167\left(\frac{2{,}300}{600}\right)^4}{(4-1)[4(0.167)-0.639]^2}(0.0042) = 60\ s/veh$$

Tiempo promedio gastado en el sistema: $\bar{t}_s$

$$\bar{t}_s = \bar{t}_q + \frac{1}{\mu} \tag{11.43}$$

$$= 60 + \frac{1}{0.167} = 66\ s/veh$$

Probabilidad de tener que esperar en la fila: $P(n \geq k)$

$$P(n \geq k) = \sum_{n=k}^{\infty} p(n) = \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k \frac{p(0)}{k!\left(1-\frac{\lambda}{\mu k}\right)} \tag{11.44}$$

$$P(n \geq 4) = \sum_{n=4}^{\infty} p(n) = \left(\frac{2{,}300}{600}\right)^4 \frac{0.0042}{4!\left[1-\frac{2{,}300}{600(4)}\right]} = 0.9069$$

Probabilidad de gastar un tiempo t o menos en el sistema: $P(t_s \leq t)$

$$P(t_s \leq t) = 1 - e^{-\mu t}\left\{1 + \frac{P(n \geq k)}{k} \times \frac{1 - e^{-\mu k t[1-(\lambda/\mu k)-1/k]}}{1-\frac{\lambda}{\mu k}-\frac{1}{k}}\right\} \tag{11.45}$$

11.6 Problemas propuestos

11.1 Uno de los accesos de una intersección con semáforos tiene un flujo de saturación de 1,900 autos por hora por carril. A dicho acceso se le ha asignado un verde efectivo de 60 segundos en un ciclo de 90 segundos. La tasa media de llegadas al acceso es de 1,200 autos por hora por carril. Efectúe

un análisis de este fenómeno de espera y calcule todos los elementos necesarios, tal como los del ejemplo 11.1.

11.2 La figura 11.5 ilustra una de las salidas de una intersección con semáforos. El semáforo para el sentido que se indica tiene un verde efectivo de 50 segundos en un ciclo de 90 segundos. Los vehículos durante el verde salen de la intersección a una tasa de 5,400 vehículos por hora en 3 carriles, los cuales llegan a un cuello de botella de 2 carriles, donde por cada carril pueden pasar máximo 1,500 vehículos por hora. Determine: 1) La demora mínima y máxima por ciclo que experimenta un vehículo que salga de la intersección. 2) La demora total por ciclo. 3) La longitud necesaria de la transición para que la cola que se genera en el cuello de botella no bloquee la intersección, si el espacio efectivo promedio que ocupa un vehículo es de 7 metros.

Figura 11.5 Cuello de botella después de un semáforo, problema 11.2

11.3 En la figura 11.6 se presenta, para un tramo de carretera, el patrón de llegadas de vehículos a un cuello de botella de capacidad 2,000 veh/h. Calcule todas las relaciones, como las del ejemplo 11.2, que caracterizan este fenómeno de espera.

11.4 La figura 11.7 muestra las características geométricas de un tramo de carretera entre los puntos A y D.

Las características del flujo vehicular para todo el tramo se ajustan a la siguiente relación:

$$v = 64.4 - 0.648k$$

Donde v es la velocidad (km/h) y k la densidad (veh/km/carril). Los volúmenes de demanda vehicular varían a lo largo del día así: 200 veh/h de las 00:00 a las 06:00. 1,800 veh/h de las 06:00 a las 08:00. 1,000 veh/h de las 08:00 a las 24:00.
Determine: 1) La velocidad y densidad a capacidad. 2) La hora a la cual termina el congestionamiento. 3) La longitud máxima de la cola.

4) La demora máxima que experimenta un vehículo. 5) La demora total de todo el tránsito. 6) La velocidad de la cola. 7) El tiempo que ahorraría un usuario en ir de *A* a *D* si madruga a las 5 de la mañana, cuando usualmente viaja a las 10 de la mañana.

Figura 11.6 *Fenómeno de espera con llegadas variables y servicio constante, problema 11.3*

Figura 11.7 *Cuello de botella por reducción de carriles, problema 11.4*

11.5 La salida de los vehículos de un estacionamiento se realiza en un solo carril. Los vehículos llegan a la caseta de salida a una tasa media de 90 vehículos por hora. El tiempo medio de entrega y pago del boleto se ha estimado en promedio de 20 segundos por vehículo. Calcule las características de operación del estacionamiento, con base en el ejemplo 11.3.

11.6 Una estación de servicio de lavado de vehículos está compuesta de 5 puestos. Los vehículos llegan durante el día en forma aleatoria a una tasa media de 4 vehículos por hora. El tiempo medio de lavado de un vehículo es de 30 minutos.

Determine las características de esta estación de servicio, siguiendo el ejemplo 11.4.

Referencias bibliográficas

[1] Box, Paul C. and Oppenlander, Joseph C. *Manual de Estudios de Ingeniería de Tránsito*, Traducción del "Manual of Traffic Engineering Studies". Cuarta edición, 1976, Institute of Transportation Engineers, Inc., Co-editores: Coordinación General de Transporte, D.D.F., Asociación Mexicana de Ingeniería de Transportes, A.C., Representaciones y Servicios de Ingeniería, S.A., México, 1985.

[2] Cal y Mayor y Asociados. *Manual de Planeación y Diseño para la Administración del Tránsito y el Transporte: Tomos III y IV, Tránsito y Transporte Público*. Segunda edición, Alcaldía Mayor de Bogotá, D.C., Secretaría de Tránsito y Transporte, Bogotá, D.C., 2005.

[3] Manheim, Marvin L. *Fundamentals of Transportation Systems Analysis, Volume 1: Basic Concepts*. Fourth printing, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, and London, England, 1984.

[4] Mannering, Fred L.; Kilareski, Walter P. and Washburn, Scott S. *Principles of Highway Engineering and Traffic Analysis*. Third edition, John Wiley & Sons Inc., New Jersey, 2005.

[5] May, Adolf D. *Traffic Flow Fundamentals*. University of California, Berkeley, Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1990.

[6] Gerlough, Daniel L. and Huber, Matthew J. *Traffic Flow Theory*. A Monograph, Special Report 165, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1975.

[7] Wohl, Martin and Martin Brian, V. *Traffic System Analysis for Engineers and Planners*. McGraw-Hill Series in Transportation, 1967.

[8] Drew, Donald R. *Traffic Flow Theory and Control*. McGraw-Hill Series in Transportation, New York, 1968.

[9] Schwar, Johannes F. and Puy Huarte, José. *Métodos Estadísticos de Ingeniería de Tránsito*, Traducción al español del original en ingles *"Statiscal Methods in Traffic Engineering"*. Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad del Estado de Ohio, Co-editores: Asociación Mexicana de Caminos, A.C., Representaciones y Servicios de Ingeniería, S.A., México, 1975.

12

Capacidad vial