

EL TRÁNSITO

El diseño de una carretera comporta, en principio, una definición integral de los ámbitos espacial y temporal. La tasa de crecimiento vegetativa del parque automotor, el crecimiento demográfico de las áreas interconectadas y las macro políticas gubernamentales de desarrollo regional son los parámetros primarios a considerar. Sin embargo, cabe destacar que durante muchos años, aún después de comenzar la construcción masiva de vehículos autopropulsados no guiados, las carreteras se proyectaban considerando solo el movimiento aislado de los automóviles. Esta práctica inconveniente tuvo su origen en el bajo número de unidades que inicialmente transitaban los caminos y no es hasta la década de los años 20 del pasado siglo cuando –principalmente en las grandes ciudades de los Estados Unidos de Norteamérica– se comienzan a establecer medidas gubernamentales tendientes a mitigar los conflictos de la circulación.

Las medidas legislativas adoptadas para las ciudades pronto hubo que extenderlas a las carreteras y en principio su aplicación, que tuvo por objetivo incrementar la seguridad vial, la realizaron cuerpos policiales especializados como la Patrulla de Caminos. La complejidad de la circulación vehicular urbana obligó al estudio detallado de sus variables como única salida técnica para la búsqueda de soluciones y es así como en algunas Universidades Estadounidenses hacen su aparición los Programas de **Ingeniería de Tráfico** que básicamente se orientaron a optimizar la explotación de las redes viales existentes. Ya en la década de los años 50 del siglo XX la Ingeniería de Tráfico se extendió hacia el proyecto de nuevas carreteras y actualmente se le tiene como una rama cardinal de la Ingeniería del Transporte.

Se define a la Ingeniería de Tráfico como la rama de la ingeniería que trata de la planificación, trazado y explotación de las redes viales, interconexiones auxiliares (estacionamientos, terminales, estaciones de transferencia modal, etc.) y zonas de influencia, así como de su relación con otros medios de transporte.

Fundamentalmente su objetivo primordial es lograr de manera segura, rápida y económica la circulación de personas y mercancías. Sus actividades están ligadas con las macro políticas de ordenación y seguridad territorial y básicamente con los planes nacionales de transporte. Las actividades de la Ingeniería de Tráfico tienen su orientación hacia dos vertientes esenciales: el **Planeamiento de las Redes Viarias**, al momento de proyectarlas para resolver las necesidades de la demanda futura y la **Ordenación del Tráfico y**

Regulación de la Circulación en redes ya establecidas, caso en el que se intenta resolver problemas actuales, temporalmente recurrentes o previsibles de ocurrir en el corto plazo.

Desde el punto de vista de la seguridad y el confort, existe una necesidad obligante de satisfacer las exigencias dinámicas de la corriente de tránsito a través de la correlación de las variables que lo tipifican. Los estudios de la circulación proporcionan a los planificadores la información esencial para la determinación de a) los parámetros de diseño geométrico, b) la clasificación sistematizada de las vías y c) el desarrollo de modelos de administración para mejoras y mantenimiento.

CARACTERIZACIÓN DE LA CORRIENTE DE TRÁNSITO

La corriente vehicular es una manifestación compleja y cambiante de la circulación vial. Es prácticamente imposible calcular con precisión los volúmenes de tránsito que pasan por cada tramo dentro de un sistema de carreteras. Aunque técnicamente es posible realizar un monitoreo vasto y prolongado del tránsito, su elevado costo lo hace inviable. En consecuencia, los estudios de los volúmenes de tránsito se realizan en base a muestreos representativos tomados en **Estaciones de Conteo** localizadas en puntos convenientemente seleccionados. Es también posible determinar otras variables del tránsito como los "**sitios de origen y destino**", la distribución modal y las características del transporte de mercancías.

Básicamente los estudios de tránsito se apoyan en la valoración de sus variables fundamentales, las macroscópicas: **Intensidad (I)**, **Velocidad (V)** y **Densidad (D)** y las microscópicas donde destacan el **Intervalo Inter-vehicular** y el **Intervalo Hueco Vehicular**, variables temporal y espacial que correlacionan cada vehículo de la corriente circulatoria con él que lo sigue.

Intensidad: Se le define como el "Número de vehículos que pasan por un perfil transversal de la vía en la unidad de tiempo". Las unidades más empleadas para expresarla son, cuando se emplea el número de vehículos por hora, la **Intensidad Horaria** y cuando se emplean los vehículos por día la **Intensidad Diaria**. Ha sido la variable más empleada en la Ingeniería de Tráfico y múltiples estudios se basan en aforos que son relativamente fáciles de realizar. Usualmente el tiempo de aforo es un año y la **Intensidad Media Diaria (IMD)** o **Tránsito Diario Promedio (TDP)** es el resultado de dividir el número total de vehículos que pasaron por la sección transversal, en el año, entre 365 días.

Para determinarla se realizan aforos en secciones predeterminadas de la carretera ya sea de forma manual o automáticamente empleando aparatos contadores adecuadamente programados. La variación de la Intensidad en el tiempo es de relevante importancia y en líneas generales se caracteriza por una tendencia a largo

plazo en la que se superponen unas oscilaciones cíclicas (anuales, semanales y diarias) y unas variaciones de carácter aleatorio. A pesar de que la forma y magnitud de las oscilaciones varían en las distintas carreteras es posible constatar en la mayoría de ellas una tendencia creciente por lo que para períodos largos habrá que tomar en consideración este crecimiento y asumir, para períodos cortos no mayores de 5 años, una tasa de crecimiento constante.

El aumento general de las intensidades de tráfico se debe primordialmente al aumento colectivo del ingreso económico y del grado de motorización. Su crecimiento brusco está asociado, sobre todo en áreas metropolitanas, industriales y turísticas, a períodos de bonanza económica y el decrecimiento a períodos de crisis económica o a zonas en regresión como zonas rurales con fuerte emigración. De manera excepcional puede observarse decrecimiento de la intensidad viaria en carreteras antiguas debido al **tránsito atraído** por la construcción de nuevas vías.

Es también un parámetro de importancia en la intensidad viaria la **Composición del Tráfico** por lo que de ordinario interesará conocer, además del número, el tipo de vehículos que transita por la sección. Una clasificación básica es:

Motocicletas (pequeños vehículos con 2 y 3 ruedas)

Vehículos ligeros (automóviles, furgonetas y camionetas con 4 ruedas)

Vehículos pesados (autobuses y camiones con 6 o más ruedas)

La composición del tráfico se define en base al porcentaje de vehículos en el **TDP** que pertenecen a cada categoría definida. La mayor parte del tráfico, en líneas generales, está formada por vehículos ligeros mientras que las motos solo ocupan un porcentaje pequeño. Dentro de los vehículos ligeros un 85-90 % lo constituyen los automóviles y un 90 % del grupo de vehículos pesados lo constituyen los camiones. Dentro del grupo de vehículos ligeros un 15-17 % pertenece a vehículos de transporte público no masivo lo que viene a representar una tendencia reciente que habrá que considerar para futuros planes de transporte.

Por supuesto que la composición del tráfico varía no solo entre carreteras sino también dependiendo del ámbito geográfico. En zonas urbanas el porcentaje de vehículos ligeros es mayor que en carreteras alcanzando en los centros de las ciudades hasta 87 %. En itinerarios rurales, lejos de las zonas de transición ciudad-campo, el porcentaje de vehículos pesados oscila en 45-55 % y en áreas rurales industriales (como en el eje Valencia-Maracay-La Victoria) pueden presentarse porcentajes aún superiores.

A la variable **Intensidad** se le denominó por muchos años "**Volumen**" hasta que en la Edición de 1985 del "*Highway Capacity Manual*" (*Manual de Capacidad de*

Carreteras) del *Transportation Research Board* de los EE.UU de Norteamérica, se le asignó este nombre actual. Entre las razones que motivaron el cambio está el hecho de que en las **retenciones** (nombre técnico de nuestras comunes "colas") la Intensidad es cero pero en apariencia el "volumen" de vehículos presentes es máximo. Otra razón que justifica notablemente el cambio de denominación es que al "volumen" se le denotaba en las fórmulas con la letra "**V**" debiéndose denotar en estas expresiones a la **Velocidad** con simbologías no correspondientes a su letra inicial.

Velocidad: Se le define como la relación por cociente entre el espacio recorrido y el tiempo empleado en recorrerlo. Esta razón de movimiento que se expresa para una velocidad constante por la expresión $V=e/t$, tiene en el análisis práctico muchas variables condicionantes: hábitos de manejo de los conductores, características geométricas de la vía, la propia dinámica de la corriente circulatoria y las condiciones atmosféricas del momento, lo que implica que un vehículo en movimiento lo hace con una velocidad que constantemente varía obligando a que los análisis deban hacerse con valores promedios de velocidad. Esta segunda variable fundamental en la caracterización de la circulación vehicular, sobre todo en vías interurbanas, tiene capital importancia en el diseño geométrico por estar indefectiblemente asociada a la seguridad. Tanto la curvatura horizontal como la vertical, a través de las distancias de visibilidad, las longitudes de transición de curvatura y peralte, etc. basan su dimensionamiento en la **Velocidad de Proyecto** que se define como "la máxima que puede mantener un conductor **promedio** en condiciones óptimas de circulación; es en consecuencia la velocidad máxima segura y cómoda". Se han definido otras velocidades que sí toman en consideración las variaciones que ésta presenta, aún en el análisis del desplazamiento de un vehículo que se intente conducir a velocidad constante; entre ellas destacan:

a) Velocidad Puntual o Instantánea: Es la que presenta un vehículo al transitar una sección transversal de la vía. La media aritmética de las velocidades de una muestra, agrupadas o no por clases, se denomina "Velocidad Media Puntual".

b) Velocidad de Recorrido: Es la media de velocidad obtenida de dividir una sección longitudinal de carretera entre el tiempo total de recorrido incluyendo paradas y retenciones.

c) Velocidad de Marcha: Relación por cociente entre una sección longitudinal y el tiempo empleado en recorrerla descontando los tiempos de parada y retención.

d) Velocidad de Operación: Es la máxima segura para un conductor "promedio" operando bajo las condiciones imperantes del tráfico. Es menor que la Velocidad de Proyecto.

La selección de la Velocidad de Proyecto en la fase de Planificación de una carretera no es una tarea sencilla y amerita hacer consideraciones que van desde los hábi-

tos de los conductores hasta las características topográficas y ambientales de las áreas donde la vía discurrirá, pasando por la definición de los niveles de servicio deseados. No es una buena práctica tomar la Velocidad Media de Marcha como la de Proyecto porque el 50 % de los vehículos (considérese la distribución de frecuencias como "normal") circulan a una velocidad superior; interesa tomar como Velocidad de Proyecto una que sea superada por un porcentaje relativamente pequeño de vehículos como corresponde al **Percentil 85** donde solo un 15 % de los vehículos la superan. La velocidad calculada por el percentil 85 de ordinario es alrededor de un 20 % superior a la velocidad media. Las "Normas para el Proyecto de Carreteras" prescriben estas recomendaciones generales:

Velocidad de Proyecto Máxima: 130 Km/h

Velocidad de Proyecto Mínima: 30 Km/h

Las **Velocidades Normalizadas** para proyectos de carreteras, en Venezuela, de acuerdo a las citadas normas, se dan en la *Tabla 3*:

<i>Tipo de Vía/relieve</i>	<i>Velocidad de Proyecto (Km/h)</i>
Autopistas (llano)	100-130
Autopistas (montañoso)	70-100
Carreteras (llano)	90-120
Carreteras (ondulado)	60-100
Carreteras (montañoso)	50-80

Tabla 3 Velocidades Normales de Proyecto según Tipo y Relieve
Fuente: Normas para el Proyecto de Carreteras (M.T.C. 1997)

Definida la Velocidad de Proyecto se correlacionarán con ella los parámetros geométricos: radios mínimos, distancias de visibilidad, longitud de las curvas verticales, longitudes de transición de peralte, etc.

FACTORES QUE AFECTAN LA VELOCIDAD

Resulta obvio suponer que la velocidad media varía entre las distintas carreteras y aun dentro de un mismo tramo con características geométricas similares. Básicamente esta variación depende de las condiciones del tráfico y del clima prevaleciente. De todos los factores incidentes es la **Intensidad** el más importante y podemos generalizar diciendo que cuando la intensidad es baja la velocidad que los conductores mantienen es discrecional mientras que al aumentar la intensidad la velocidad viene condicionada en gran medida por la de los otros conductores, originándose una disminución de la velocidad media. Si la intensidad es muy alta la geometría de la carretera influye muy poco en su valor medio y

hasta puede argumentarse que resultará la misma para todos los tipos de vehículos. La influencia de la geometría de la vía sobre la velocidad se aprecia notablemente con bajos valores de intensidad y la manifestación de este fenómeno psico-sensorial ha sido estudiada empíricamente dando lugar a una teoría ampliamente empleada en la asignación del peralte. Esa velocidad, inducida por los radios de las curvas horizontales, recibe el nombre de **Velocidad Directriz** y su aplicación práctica se tratará en el Tema "Peralte y Curvatura Normalizada". La *Figura 10* muestra la distribución de las velocidades de circulación bajo distintos valores de intensidad:

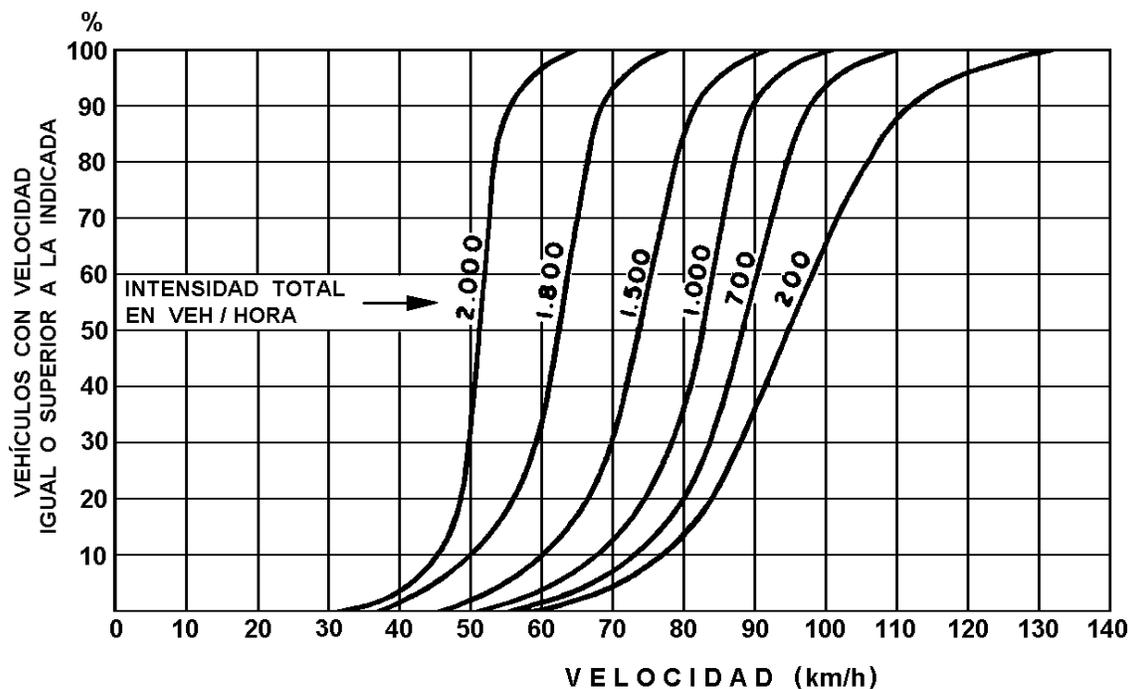


Figura 10 Distribución Típica de Velocidad de circulación de vehículos livianos en carreteras de 2 canales. Fuente: "Elementos de Ingeniería de Tráfico" Departamento de Transporte, Universidad Politécnica de Madrid (1991)

Densidad: Variable fundamental cuya interpretación tiende a confundirse con la Intensidad. Se le define como el "número de vehículos presentes, en un momento dado, en la unidad de longitud de una vía". Esta magnitud –que puede obtenerse fácilmente a partir de una fotografía aérea del tramo contando el número de vehículos– pocas veces se determina en forma directa ya que resulta más sencillo calcularla a partir de medidas de la Intensidad y la Velocidad. El máximo valor de la Densidad se obtiene en las retenciones cuando los vehículos, ocupando todos los canales, se presentan formando largos trenes sin **Intervalo Hueco Vehicular**. En ese momento la Velocidad de Recorrido tiende a cero.

Es solo a partir de 1985 cuando, en el "*Highway Capacity Manual*", se define la Densidad como una variable fundamental del Nivel de Calidad de la Circulación. Así, la libertad de maniobra que los conductores pueden encontrar, la separación lateral, o la existente entre vehículos consecutivos, son variables apreciadas por el conductor que inciden directamente en la valoración que éste haga de la circulación.

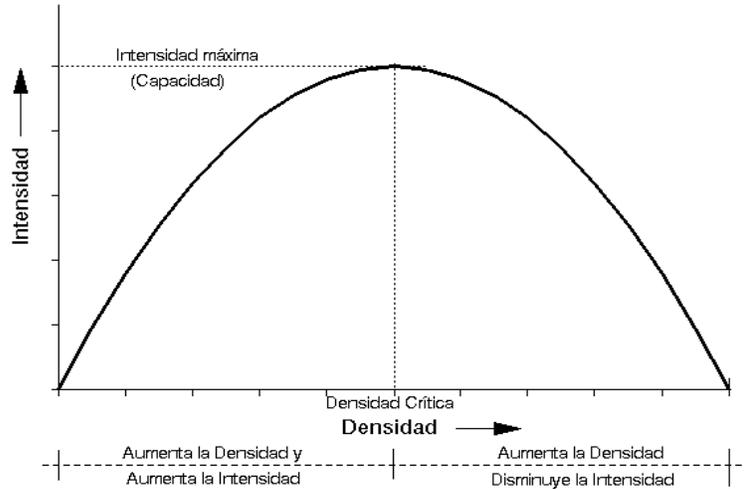


Figura 11 Relación Ideal Intensidad/Densidad
 Fuente: *Elementos de Ingeniería de Tráfico*
 Universidad Politécnica de Madrid, 1991.

Entre estas variables fundamentales existen relaciones biunívocas muy bien estudiadas que constituyen el pilar cardinal de la Ingeniería de Tráfico; analice con detenimiento estas relaciones en las *Figuras 11, 12 y 13* y saque algunas conclusiones.

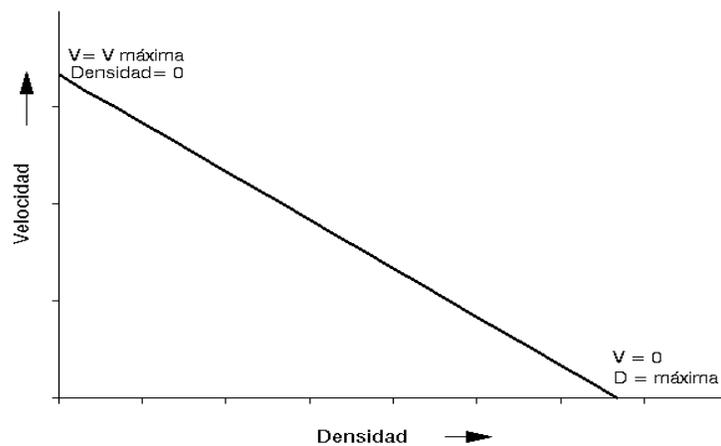


Figura 12 Relación Ideal Velocidad/Densidad
 Fuente: *Elementos de Ingeniería de Tráfico*
 Universidad Politécnica de Madrid, 1991.

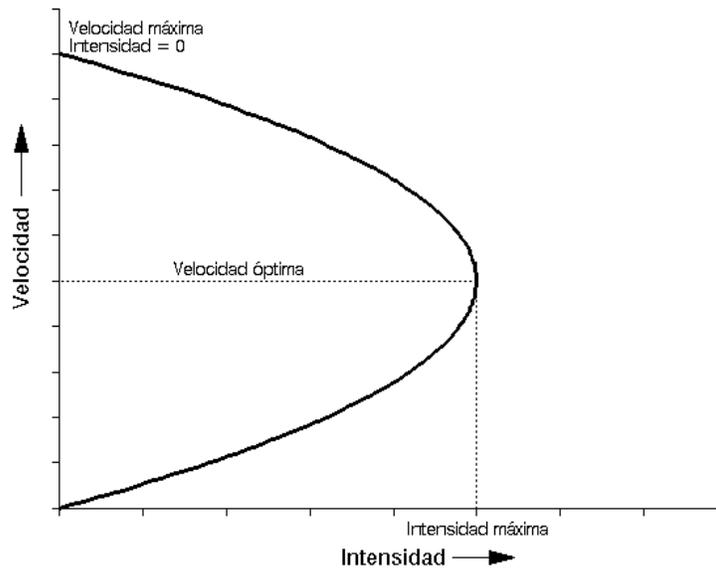


Figura 13 Relación Ideal Velocidad/Intensidad
 Fuente: Elementos de Ingeniería de Tráfico
 Universidad Politécnica de Madrid, 1991.

La ecuación que correlaciona las variables Intensidad, Velocidad y Densidad se denomina **Ecuación Fundamental del Tráfico**:

$$I = V \times D$$

Se acepta que esta igualdad se cumple cuando la Velocidad y la Densidad son homogéneas y no bajo condiciones erráticas. En el alcance de este curso no está contemplado un estudio amplio de estas variables, que sí es el propósito de los cursos de Ingeniería de Tráfico, por lo que nos limitaremos a resolver un ejemplo sencillo donde las relaciones entre variables queden expuestas.

Los datos que se presentan corresponden al canal lento de una vía no dividida de cuatro canales de circulación:

Velocidad Media de Marcha: **80 Km/h**

Intensidad Media Horaria: **1.600 vehículos/h**

Se desea conocer a) la **Densidad**, b) el **Intervalo Hueco Vehicular** (también llamado **Espaciamiento**: distancia métrica entre las partes delanteras –o traseras– de dos vehículos similares consecutivos) y c) el **Intervalo Intervehicular** (más comúnmente **Intervalo**: tiempo en segundos que transcurre durante el paso de dos vehículos consecutivos por la sección transversal de la vía).

Por la Ecuación Fundamental del Tráfico se tiene:

$$a) \quad D = \frac{I}{V} = \frac{1.600 \text{ veh/h/canal}}{80 \text{ km/h}} = 20 \text{ veh/km/canal}$$

$$b) \quad \text{Intervalo Hueco Vehicular (Espaciamiento)} = \frac{1.000}{20} = 50 \text{ m}$$

$$c) \quad \text{Intervalo Intervehicular (Intervalo)} = \frac{3.600}{1.600} = 2,25 \text{ seg}$$

CAPACIDAD Y NIVELES DE SERVICIO DE LAS CARRETERAS

El análisis de las relaciones entre las variables macroscópicas del tráfico nos conduce a pensar que existe un valor máximo de la Intensidad de tráfico que puede ser absorbida por una carretera. Este límite máximo o **Capacidad** de la carretera —que en la práctica define un estado de la circulación inaceptable— tiene una importancia capital en el proyecto de nuevas carreteras y en la explotación de las ya construidas. Por una parte permite proyectarla a futuro anticipado el grado de satisfacción de la demanda y por otra evita que se construyan vías sobredimensionadas. Durante el progreso teórico de la Ingeniería de Tráfico se han desarrollado métodos para determinar la capacidad de una carretera. Estos métodos, necesariamente basados en mediciones empíricas por la compleja diversidad de situaciones de la corriente circulatoria y tipos de carreteras, impiden la formulación de un modelo teórico general aplicable en la praxis.

Dentro de los métodos ensayados para medir la capacidad destaca el formulado por el “Manual de Capacidad de Carreteras” cuya primera aproximación data del año 1935. En 1991 se tradujo al castellano la edición de 1985.

A la **Capacidad** de una sección de la carretera se le define como el "número máximo de vehículos que tiene una probabilidad razonable de atravesar la sección durante un período de tiempo (usualmente 15 minutos) bajo las condiciones prevalecientes de la vía y del tráfico". Se le suele expresar en vehículos por hora.

Por condiciones de la vía se entienden las características geométricas como pendientes, velocidad de proyecto, número de canales, ancho de los mismos, etc. mientras que por condiciones del tráfico se entienden su composición, hábitos de los conductores promedio, distribución por canal, etc. En carreteras multicanal la Capacidad se indica por sentido de circulación y en las de dos canales se expresa como la suma de ambas direcciones. Para que una sección de carretera alcance su capacidad es necesario que haya en su acceso un número importante de vehículos y que no esté precedida de otra sección de menor capacidad. Tampoco debe existir una sección posterior de menor capacidad que pueda originar retenciones en la sección considerada.

Las condiciones imperantes de tráfico, en el umbral de la Capacidad, son deficientes en grado superlativo: la velocidad está muy por debajo de la de proyecto, el Intervalo hueco vehicular tiende a cero y la libertad de maniobra es casi nula. Por estas razones no conviene que la carretera trabaje a capacidad y sí con intensidades de tráfico inferiores. La solución tampoco sería diseñar una vía cuya capacidad estuviese muy por encima de la demanda porque resultaría un dispendio de los recursos financieros que son, por su misma naturaleza, escasos.

Dado que una misma condición de tráfico puede ser aceptable por los usuarios en ciertas situaciones e inaceptable en otras, el *Manual de Capacidad de Carreteras* introdujo una escala de condiciones de la circulación –desde las óptimas hasta las más deficientes– tomando siempre como referencia la valoración del usuario. Al resultado práctico de esa noción teórica se le conoce como **Nivel de Servicio** que es una "medida esencialmente cualitativa de las condiciones de circulación, que toma en cuenta el efecto de varios factores tales como la velocidad y tiempo de recorrido, la seguridad, la comodidad de conducción y los costos de funcionamiento".

Habida cuenta que esa valoración es el producto de una combinación de elementos cambiantes con el tipo o componente de carretera considerado (intersecciones, tramos de dos canales, autovías, autopistas), los Niveles de Servicio se tipifican con una combinación de uno o dos factores de los mencionados que puedan medirse fácilmente o que sean representativos del estado de la circulación de ese elemento.

El Manual de Capacidad separa el análisis en dos vertientes: autopistas y vías de alta capacidad (autovías, carreteras multicanal) y carreteras de dos canales e intersecciones. Los elementos resaltantes a estudiar en las autopistas son: las zonas de bifurcación o divergencia, las zonas de confluencia y los segmentos básicos donde la influencia de los dos primeros elementos no se manifiesta. El análisis de los niveles de servicio se hace bajo la suposición de circulación continua. Los niveles definidos para este tipo de vía se denotan con las letras A, B, C, D, E y F siendo el F el nivel que corresponde a una situación de congestión originada por una intensidad viaria superior a la capacidad del tramo de carretera y el nivel E a una circulación equivalente a la capacidad.

En carreteras de dos canales los elementos geométricas a considerar son las intersecciones y la inevitable invasión del canal de circulación contraria para el adelantamiento de vehículos lentos. Los niveles definidos van del A hasta el F siendo el nivel E el representativo de la capacidad de la carretera.

Las consideraciones hasta aquí hechas al estudio de la Circulación Viaria cubren los requerimientos del Programa Actualizado de la asignatura Ingeniería Vial I por lo que consideramos el tema suficientemente tratado.