



Variables Fundamentales del Tráfico: Intensidad, Velocidad y Densidad

Apellidos, nombre	López Maldonado, Griselda ² (grilomal@tra.upv.es) Pérez Zuriaga, Ana María ¹ (anpezu@tra.upv.es) Camacho Torregrosa, Fco. Javier ³ (fracator@tra.upv.es)
Departamento	^{1,2,3} Ingeniería e Infraestructuras de los Transportes
Centro	Universitat Politècnica de València



1 Resumen de las ideas clave

En este artículo se presentan las Variables Fundamentales del Tráfico y los procedimientos de cálculo necesarios para obtenerlas. El conocimiento de estas variables es la base de partida para cualquier estudio del tráfico en un determinado elemento viario.

2 Introducción

Los pilares básicos para el estudio del comportamiento del tráfico de vehículos parten del conocimiento de las Variables Fundamentales: Intensidad, Velocidad y Densidad. Así como de las relaciones fundamentales entre estas variables, conocidas como las Relaciones Fundamentales del Tráfico.

La circulación del tráfico de vehículos puede producirse de un modo continuo o de un modo discontinuo. ¿Sabes cuál es la diferencia?

- Circulación continua: no existen elementos de regulación fijos externos al flujo de tráfico que obliguen a detenerse a los vehículos (semáforos, señalización, etc.), sino que, en caso de presentarse detenciones, estas se producen por causas internas de la propia corriente del tráfico (accidentes, averías, colisiones, etc.)
- Circulación discontinua: existen elementos fijos que producen interrupciones periódicas en la circulación (semáforos, stop, etc.), obligando a los vehículos a detenerse o a reducir significativamente su velocidad.

El estudio de las Variables Fundamentales se realiza suponiendo una circulación continua de los vehículos.

3 Objetivos

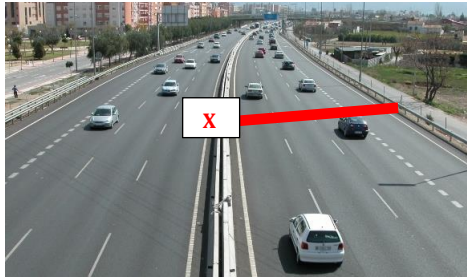
Una vez que el alumnado se lea con detenimiento este documento, será capaz de:

- Calcular la Intensidad, Densidad y Velocidad del tráfico en una carretera, así como las magnitudes representativas de estas variables.
- Calcular las variables derivadas (Intervalo y Espaciamiento) a partir de los valores de las Variables Fundamentales del Tráfico.
- Deducir y aplicar la Ecuación Fundamental del tráfico.

4 Intensidad

La intensidad es la característica más importante de la circulación vial porque proporciona una descripción muy intuitiva del estado de la carretera, permitiendo caracterizar el tipo de circulación en un tramo viario. Además, el resto de las variables se relacionan con ella por medio de la Ecuación Fundamental del Tráfico que se explicará en el punto 8.

La intensidad puede definirse como el número total de vehículos que pasan por un punto o sección de vía durante un tiempo determinado (imagen 1).



$$I = \frac{n(X)}{t}$$

$n(x)$: Número de vehículos que atraviesan la sección fija

t : Intervalo temporal

Imagen 1. Obtención de la Intensidad.

Las variaciones de la intensidad del tráfico a lo largo del tiempo son de especial importancia para la caracterización del tráfico. Los cambios de la intensidad siguen una ley que puede asimilarse a una tendencia a largo plazo que se ve afectada por otras oscilaciones de carácter cíclico (anuales, semanales o diarias) y de carácter aleatorio (debidos a las características de los conductores), tal y como se muestra en la imagen 2. Pese a no ser iguales en forma y magnitud en todas las carreteras, sí que puede observarse una cierta similitud entre ellas en su comportamiento, y, por ello, pueden estudiarse por separado sus causas.

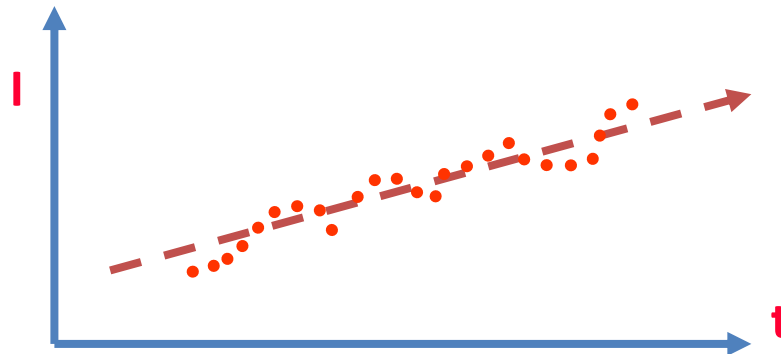


Imagen 2. Variación de la Intensidad a largo plazo.

Entre los factores que contribuyen a que las variaciones de tráfico sean más acusadas, se pueden destacar:

- El carácter turístico: algunas zonas tienen una gran intensidad en determinadas épocas del año (variaciones anuales); o en determinados días de la semana (variaciones semanales).
- Zonas con bajas intensidades de tráfico: se pueden presentar tendencias decrecientes en zonas en regresión, como zonas rurales en las que se produce una fuerte migración (variaciones anuales).
- Proximidad a gran población: se pueden presentar variaciones en zonas próximas a una gran población que suele generar viajes de recreo de corto recorrido (variaciones semanales).

Durante el día, los fenómenos de oscilación de intensidades deben estudiarse a partir de las intensidades horarias. En general, las menores intensidades se producen



en horario nocturno, especialmente de madrugada. Mientras que las mayores intensidades se producen por la mañana y/o por la tarde, según la localización del tramo. En vías suburbanas, por ejemplo, se observarán puntas de tráfico en torno a esas horas del día (horas punta), al concentrarse el tráfico de trabajadores procedente de las localidades colindantes, para luego descender a un valor medio (horas valle) y volver a repetirse el fenómeno durante la última hora de la tarde.

Conocidas las variaciones de la Intensidad, tómate un momento para contestar a la siguiente pregunta:



¿Cuáles son las magnitudes representativas de la intensidad?

Las magnitudes más usadas son la Intensidad horaria (vehículos/hora) y la Intensidad diaria (vehículos/día). De modo que, desde el punto de vista de la Ingeniería del Tráfico, interesan especialmente dos valores de referencia asociados cada uno a estas magnitudes:

- **Intensidad en hora punta** número de vehículos que pasan por una sección durante la hora que se considera representativa de las condiciones de mayor circulación.
La intensidad horaria se utiliza para el proyecto y la gestión de las carreteras, análisis de la capacidad de las vías, estudios de las características de las intersecciones y enlaces, control de tráfico, coordinación de semáforos, etc.
- **Intensidad media diaria anual:** número de vehículos que pasan por una sección durante un año, dividido por 365 días. Puede considerarse como la intensidad de tráfico que corresponde al día medio del año.
La IMD se utiliza fundamentalmente para el planeamiento y diseño de carreteras, clasificación de vías, priorización de actuaciones, determinación de tendencias en el uso de las vías, determinación de características geométricas de carácter general, etc.



¿Qué magnitud relacionada con la intensidad de tráfico se utiliza para realizar el proyecto de una vía?

La IMD no debería utilizarse porque si se toma este valor como referencia, la vía estaría infradimensionada, habría muchas horas al año en las que la vía no tendría capacidad para absorber la demanda.

Las intensidades horarias son las que determinan las características de la vía para hacer frente a la demanda, sin embargo, no es lógico dimensionar tomando como referencia el valor máximo de la intensidad horaria de una vía (se estaría sobredimensionando la solución); tampoco sería posible utilizar únicamente su valor medio, dada su variabilidad. Debe ponderarse un equilibrio entre el coste de la solución y la capacidad de la misma.

Para determinar la intensidad horaria que debe considerarse para el proyecto de una vía, hay que tener en cuenta la frecuencia con la que se presentan los distintos valores de esta intensidad. Esto se realiza empleando el concepto de distribución

de frecuencia acumulada. Representando el número de horas al año en el que se sobrepasan determinados valores de intensidad, se obtienen curvas similares a las mostradas en la imagen 3 (cada línea representa una carretera).

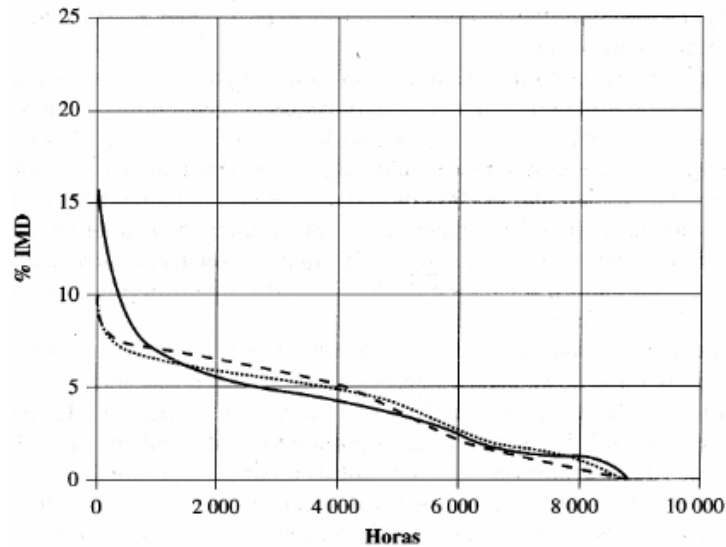


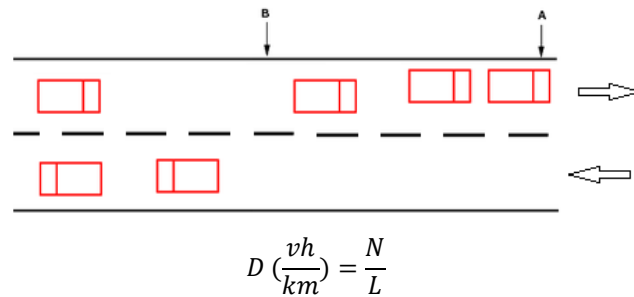
Imagen 3. Frecuencias de las intensidades horarias acumuladas en diversas carreteras.

Excepto para las 100 horas de mayor intensidad, la intensidad horaria disminuye lentamente al aumentar la frecuencia con la que se sobrepasan los valores de intensidad. Es necesario elegir un valor de equilibrio para alcanzar una solución óptima. Se recomienda escoger un valor de la intensidad horaria que sea sobrepasado durante un valor determinado de horas a lo largo del año. En la práctica, para la intensidad horaria, se considera aquella que sólo se sobrepasa durante 30 o 100 horas al año, en función de los requerimientos, denominándose como IH30 e IH100. Como se muestra en la imagen 3, los valores que pueden tomarse como referencia para la intensidad horaria de proyecto están situado en el entorno del codo de la curva.

5 Densidad

La densidad puede definirse como el número de vehículos que existen en un tramo de carretera por unidad de longitud de la misma, para un instante dado (imagen 4).

La densidad puede medirse de diferentes modos. Sin embargo, el más representativo puede ser el basado en el conteo de vehículos en una fotografía de un tramo de carretera de longitud conocida. En la práctica, esta variable rara vez se mide, ya que es posible obtenerla partir de medidas de velocidad e intensidad, y la relación que existe entre ellas, como se verá más adelante.



N - número de vehículos entre A y B (vh)
L - Longitud del tramo (km)

Imagen 4. Obtención de la Densidad.

La densidad de tráfico influye en la calidad de la circulación, ya que al aumentar el valor de esta variable resulta más difícil mantener la velocidad que el conductor desea. Si la densidad se acerca a su valor máximo (cuando todos los vehículos están en fila), se circula muy lentamente con frecuentes paradas y arranques, el conductor tiene que realizar un mayor número de maniobras, generando una conducción muy incómoda.

6 Velocidad

El conocimiento de la velocidad es un factor necesario en la gestión de tráfico, siendo de vital importancia dada su influencia tanto en la eficiencia del flujo circulatorio como en la seguridad vial.

De los tres conceptos que definen la circulación, la velocidad puede ser el más complejo, dado su carácter variable tanto de forma individual (velocidad de cada vehículo) como de un conjunto de vehículos. La velocidad en un tramo de carretera varía mucho de unos conductores a otros, incluso cuando se analiza la velocidad de un vehículo, esta no es constante, aunque el conductor intente mantenerla fija.

Los condicionantes que hacen que la velocidad sufra fluctuaciones están relacionados con las propias características de la vía, el tipo de vehículo, el conductor, factores relativos al tráfico, al entorno, a las condiciones medioambientales, y a la propia existencia de sistemas de control de velocidad de la carretera.

En general, la velocidad puede definirse como la relación existente entre el espacio recorrido y el tiempo empleado en recorrerlo, y suele expresarse en km/h. Sin embargo, existen conceptos más específicos dependiendo de si la velocidad se refiere a la de un vehículo determinado o bien si se refiere al conjunto de la circulación.

- Velocidad puntual: es la velocidad de un vehículo al pasar por una sección.
- Velocidad instantánea: es la velocidad de un vehículo en un momento determinado.
- Velocidad de recorrido: es la velocidad media conseguida por un vehículo al recorrer un tramo de la carretera, es decir el cociente entre la distancia recorrida en un tramo determinado y el tiempo que transcurre desde el instante

en que el vehículo inició el viaje hasta que llega a su destino, incluyendo las posibles detenciones y retrasos debidos al tráfico.

- *Velocidad de circulación*: es el cociente entre la distancia recorrida en un tramo determinado y el tiempo que el vehículo está en movimiento.
- *Velocidad media temporal*: es la velocidad media de todos los vehículos que pasan por un punto fijo de la carretera durante cierto período de tiempo.
- *Velocidad media espacial*: es la velocidad media de todos los vehículos que en un instante dado se encuentran en un tramo determinado de la carretera.
- *Velocidad media de recorrido*: es la media de las velocidades de recorrido de todos los vehículos en un tramo de carretera.
- *Velocidad media de circulación*: es la media de las velocidades de circulación de todos los vehículos en un tramo de carretera.

CUIDADO!!!



En zonas urbanas y en algunas carreteras interurbanas es frecuente que la velocidad de cada vehículo sufra grandes cambios durante el viaje, llegando incluso a anularse en algún momento (por ejemplo, en una travesía con semáforos).

En estos casos, si se desea estimar la calidad del servicio ofrecida al usuario, el conocimiento de las velocidades instantáneas es poco representativo, resultando más útil trabajar con velocidades medias de recorrido.

7 Otras variables

Además de las variables comentadas anteriormente, existen otras variables que pueden derivarse de las fundamentales y que ayudan a matizar determinadas características del tráfico. Estas variables son el intervalo y el espaciamiento, según se muestra en la imagen 5.

Intervalo: Es el tiempo transcurrido entre el paso de dos vehículos consecutivos por una sección de carretera. El intervalo medio (T) se calcula como la media entre intervalos:

$$T = \sum \frac{t_i}{n},$$

donde t_i es el intervalo entre vehículos y n , es el número total de vehículos.

El intervalo medio (T) puede expresarse en función de la intensidad (I):

$$T = \frac{1}{I}$$

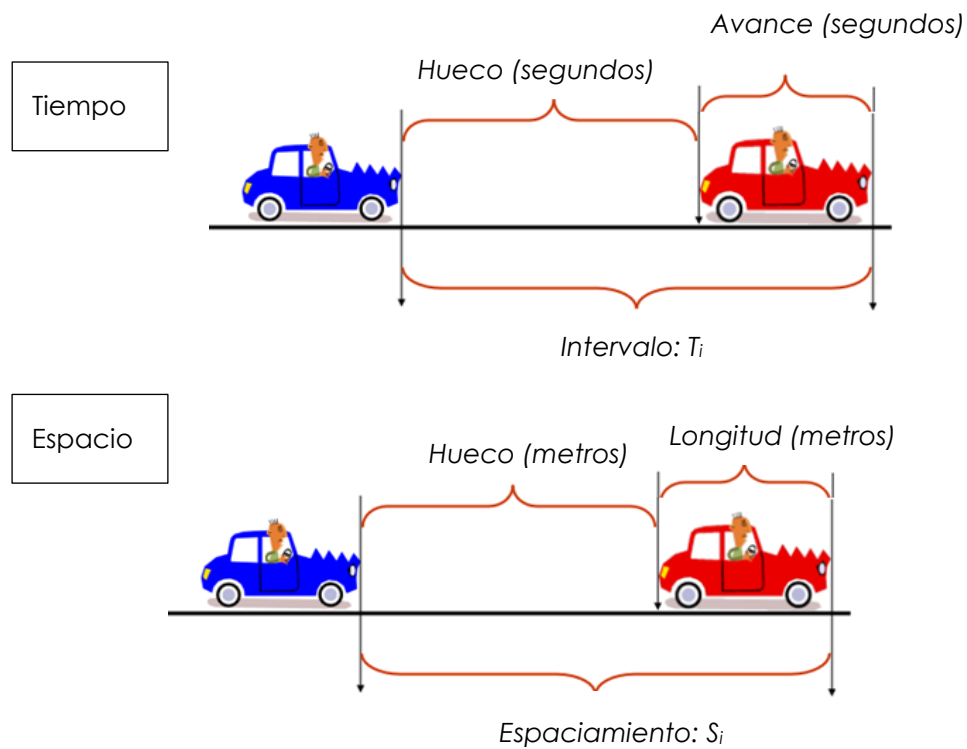


Imagen 5. Caracterización de otras variables del tráfico.

Espaciamento: es la distancia existente entre las partes delanteras de dos vehículos que circulan consecutivamente. El espaciamento entre vehículos (S_i) se obtiene como:

$$S_i = \text{Longitud del vehículo} + \text{Longitud del hueco}$$

El espaciamento entre vehículos es una variable derivada de la densidad. El espaciamento medio (S) se calcula como la media de los espaciamentos entre vehículos:

$$S = \sum \frac{s_i}{n}$$

donde s_i es el espaciamento entre vehículos y n , es el número total de vehículos.

El espaciamento medio (S) puede expresarse en función de la densidad (D).

$$S = \frac{1}{D}$$

8 Ecuación Fundamental del Tráfico

Entre las variables fundamentales de la circulación que han sido analizadas en los puntos anteriores, existen relaciones que permiten deducir una de ellas, a partir de los valores de las otras, conociendo la ecuación fundamental que las relaciona:

$$I = D \cdot V_{me}$$

I-Intensidad, D- densidad, V_{me} - media espacial

Ecuación 1. Ecuación fundamental del tráfico.



IMPORTANTE!! La ecuación puede obtenerse de un modo directo realizando un análisis dimensional de las variables implicadas. Veamos cómo obtenerla:

$$\left. \begin{array}{l} I = \frac{[vh]}{[T]} \\ D = \frac{[vh]}{[L]} \\ V = \frac{[L]}{[T]} \end{array} \right\} \frac{[vh]}{[T]} = \frac{[vh]}{[L]} \cdot \frac{[L]}{[T]}$$

9 Conclusión

En este documento se ha mostrado cuáles son las variables fundamentales del tráfico (intensidad, velocidad y densidad), para qué se emplean, cómo se calculan y cómo se relacionan entre ellas mediante la ecuación fundamental del tráfico.

Con estos conocimientos básicos, es posible calcular sus valores a partir de unos datos determinados.



Vamos a comprobarlo:

Se dispone de una carretera convencional de intensidad desconocida, a la que se le hace una fotografía aérea a las 13:34 h. En 600 m de longitud se cuentan 10 vehículos en sentido creciente y 8 vehículos en sentido decreciente. Responde a las siguientes cuestiones:

- ¿Cuál es la densidad por sentido? ¿Y globalmente?
- ¿Cuál es el espaciamiento medio entre vehículos?
- ¿Serías capaz de determinar la intensidad sabiendo que la velocidad en ese tramo de carretera es de 60 km/h?



- a. ¿Cuál es la densidad por sentido? ¿Y globalmente?

$$Dc = \frac{10 \text{ vh}}{600 \text{ m}} = 0,0167 \frac{\text{vh}}{\text{m}} \rightarrow 16,7 \frac{\text{vh}}{\text{km}}$$
$$Dd = \frac{8 \text{ vh}}{600 \text{ m}} = 0,0133 \frac{\text{vh}}{\text{m}} \rightarrow 13,3 \frac{\text{vh}}{\text{km}}$$
$$Dg = \frac{18 \text{ vh}}{600 \text{ m}} = 0,03 \frac{\text{vh}}{\text{m}} \rightarrow 30 \frac{\text{vh}}{\text{km}}$$

La densidad global también podría obtenerse como suma de las intensidades por sentidos

- b. ¿Cuál es el espaciamiento medio entre vehículos?

Para el cálculo del espaciamiento medio se utiliza la densidad global

$$Sm = \frac{1}{30} = 0,033 \frac{\text{vh}}{\text{km}} \rightarrow 33 \frac{\text{vh}}{\text{m}}$$

- c. ¿Serías capaz de determinar la intensidad sabiendo que la velocidad en ese tramo de carretera es de 60 km/h?

Para resolver este punto se emplea la Ecuación Fundamental de Tráfico que permitirá obtener la intensidad a partir de unos valores de velocidad y densidad conocidos.

$$I = 60 \frac{\text{km}}{\text{h}} \cdot 30 \frac{\text{vh}}{\text{km}} = 1800 \text{ vh/h}$$

10 Bibliografía

Kraemer, C. et al. (2004). "Ingeniería de Carreteras. Vol. 1". McGraw-Hill.

Belda Esplugues, E. (2011). "Parámetros fundamentales del tráfico: densidad, intensidad y velocidad". Temario General de la ESTT - OEP 2011. Grupo de Materias Generales. <http://www.dgt.es/es/la-dgt/empleo-publico/oposiciones/2011/temario-parte-general-convocatoria-2011.shtml>