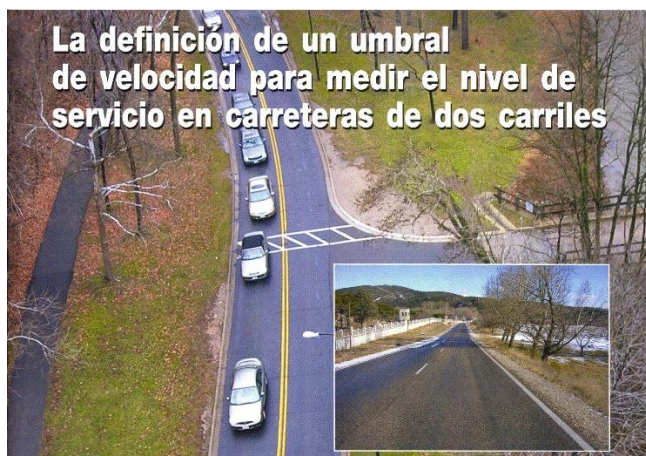


La definición de un umbral de velocidad para medir el nivel de servicio en carreteras de dos carriles

Manuel G. Romana, Departamento de Ingeniería Civil-Transportes, Universidad Politécnica de Madrid

Ignacio Pérez Pérez, Área de Ingeniería e Infraestructura de los Transportes, Universidade da Coruña.



Resumen

Este artículo presenta una manera alternativa de emplear la velocidad de recorrido y el porcentaje de tiempo siguiendo (que son las dos variables utilizadas por el Manual de Capacidad) para evaluar el nivel de servicio en carreteras de dos carriles. Implica la definición de una velocidad umbral aceptable para los usuarios. Los viajeros esperan un servicio diferente de vías diferentes, y en el caso de carreteras convencionales de dos carriles el deseo de adelantar o el nivel de estrés o ligera frustración de los conductores no es una función únicamente del intervalo que les separa del vehículo precedente, ni de la diferencia entre la velocidad desarrollada y la deseada. Por tanto, los planteamientos simplistas no reflejan adecuadamente el punto de vista del conductor. El procedimiento de la velocidad umbral puede ser empleado en carreteras de tipos I y II (clasificación actual) o para otros tipos que puedan ser considerados en el futuro.

Palabras clave: Carreteras, Nivel de servicio, Ingeniería de carreteras, Ingeniería de tráfico.

Introducción

El nivel de servicio (NS) de una infraestructura es una medida puramente cualitativa de las condiciones de circulación, que tiene en cuenta el efecto de varios factores, como la velocidad y el tiempo de recorrido, la seguridad, la comodidad de la conducción, y otros. El concepto fue introducido en la ingeniería de carreteras por el Manual de Capacidad de Carreteras (en inglés, Highway Capacity Manual o HCM). La manera de considerar estos factores varía con cada tipo de infraestructura; y finalmente se adjudica a la infraestructura una calificación que varía desde A (óptimo) a F (pésimo).

El Manual de Capacidad de Carreteras plantea, en su edición vigente del 2000, el empleo de dos variables para medir el nivel de servicio en carreteras convencionales de dos carriles.

Fue el primer caso en el que se adoptaron dos variables, y se planteó esta necesidad para remediar las situaciones anteriores. En las primeras ediciones se empleaba únicamente la velocidad media (VM), que no era un indicador que separara claramente las distintas situaciones de la circulación. En 1985 se decidió cambiar, adoptando el porcentaje de tiempo siguiendo a otro vehículo (PTS). Ninguna de estas dos variables es capaz, por sí sola, de recoger la complejidad de la circulación en una carretera de dos carriles: no basta, pues, con optar por una o por otra. Los investigadores han propuesto otras variables, que en algunos casos han sido adoptadas, como por ejemplo en Alemania, Finlandia o Sudáfrica.

PTS	Tiempo de reacción	Velocidad del seguidor	Análisis estadístico	Demanda de adelantamientos	Separación
Harwood et al. (3 s)	Athol (2,1 s)	OCDE (5 s)	Smelt (8 s)	Morrall y Werner (5 - 6 s)	Byrne y Roberts (152,4 m, o 5 - 6 s)
	Chrissipoulos (1,2 - 2 s)	Manual 85 (Messer) (5 s)	Miller (2 to 8 s)	Romana (4 s)	Rodríguez (61 m, o 2 - 3 s)
		Underwood (5 s)	Wasilieswski (2 s)		
		Manual 65 (3 - 5 s)	Buckley (4 s)		
		Pahl and Sands (4 - 5 s)	Branston (3,75-4,5 s)		
		Hoban (6 s)	Breinman (3 s)		
		Botma (5 s)	Ovuworie (> 2,8-3,8 s, libre) (< 1,4-2,0 s, en cola)		

Otros: Valdés et al. (8 s) / George (6 s) / Schlums (8 s) / Leutzbach (7 s) / Edie y Foote (11 s) / Cunagin y Chang, Radwan y Kalevela (9 s) / Edie et al. (4-5 s) / Guell y Virkler (3,5-4 s) / Krumins (5-6 s) / Rozic (9 s) / Pursula y Enberg (5 s) / Hoban (4 s)

TABLA 1. Valores del intervalo crítico según diversos autores y criterios (valores en segundos en Romana, 1995).

El HCM 2000 propone el uso de las dos variables simultáneamente en todos los casos, declarándose como nivel de servicio el peor de los dos posibles. Este artículo presenta una manera alternativa de emplear las dos variables. Para ello se plantea la definición de una velocidad umbral (V_u), que es el valor mínimo aceptable para los usuarios. En los casos en los que se han realizado encuestas a los usuarios, éstos parecen tener una noción bastante clara de sus expectativas en cuanto a la velocidad aceptable, o, lo que es lo mismo, de esta velocidad umbral.

El valor de esta V_u depende de las características de la vía y de la conducción por ella. Los usuarios tienen diferentes expectativas de circulación dependiendo del tipo de vía y de sus características, pero también de las razones por las que realizan un determinado viaje. En las carreteras de dos carriles, el deseo de adelantar y la acumulación de tensión y una cierta frustración que pueden experimentar los usuarios al tener que circular a velocidades por debajo de las deseadas no son únicamente una función de si circulan en cola o no, o de la diferencia entre la velocidad deseada y la real. Por ello, cualquier aproximación simplificadora lleva a separarse del punto de vista del usuario. La consecuencia no deseable más relevante de

estas aproximaciones es que pueden dar lugar a una inversión que no mejore el nivel de servicio en opinión de los conductores.

Una ventaja no desdeñable del procedimiento que se expone es que puede adaptarse a los muy diferentes tipos de carreteras de dos carriles existentes: en efecto, las carreteras de dos carriles son las vías más abundantes, y las que presentan más variaciones entre unas y otras. De hecho, el HCM 2000 plantea dos tipos de carretera convencional (tipos I y II), y en el seno de la comunidad técnica está apareciendo la necesidad de definir más tipos de carreteras diferentes. Concretamente, se viene discutiendo en los últimos años la necesidad de contar con un tipo III de carretera en medios periurbanos.

El valor del intervalo crítico

Cuando se miden los intervalos de tiempo entre puntos homólogos (normalmente, los parachoques delanteros) de dos vehículos consecutivos que viajan en el mismo sentido a su paso por un punto fijo de la carretera, se denomina intervalo crítico a un umbral adoptado de manera que se considera que un vehículo está demorado por el precedente si su intervalo con éste es menor que el intervalo crítico.

El Manual de Capacidad del 2000 propone 3 s, dado que, de acuerdo con Harwood et al. (1999), este valor es el que presenta una correlación más elevada con el PTS. Casi todos los estudios desarrollados entre 1985 y 1999 proponen valores entre 3 y 4 segundos [Harwood et al. (1999), Guell y Virkler (1988), Romana (1995), Van As (2003)]. En la tabla 1 se resumen los distintos valores propuestos en la literatura. Sin embargo, en casi todos los casos se destaca que no hay grandes diferencias entre adoptar 3 y 4 segundos.

Variables que se pueden emplear y metodologías existentes

La metodología del HCM 2000

La metodología recogida en el HCM es sin duda la más conocida, y por ello se resume sucintamente. Se emplean dos variables simultáneamente: VM y PTS. A continuación, se definen dos tipos de carretera convencional, tipos I y II: en las carreteras de tipo I las dos variables influyen en la determinación del NS, mientras que en las de tipo II sólo es relevante el PTS.

Tanto la velocidad media (VM) como el porcentaje de tiempo siguiendo (PTS) son variables que se definen en un tramo de carretera, y no en una sección transversal determinada. Además, el PTS sólo puede ser realmente evaluado en una simulación, ya que su cálculo obligaría a seguir a una población estadísticamente representativa durante la totalidad del recorrido. El HCM incluye una estimación del PTS a partir del porcentaje de vehículos que circulan por un punto de la carretera con intervalos inferiores a 3 s con el vehículo anterior. Sin embargo, no ofrece ninguna guía acerca de cómo debe realizarse esta medida, ni de cómo se selecciona la sección, ni durante cuánto tiempo o qué número de vehículos hay que medir.

Las carreteras se dividen en dos tipos, denominados tipos I y II. Las carreteras de tipo I son aquéllas en las que los usuarios esperan viajar a velocidades relativamente elevadas. Las del tipo II son las carreteras que, traduciendo literalmente, "*atravesan un terreno accidentado en las que los usuarios no esperan (viajar a) velocidades elevadas*". Las carreteras de tipo I son las más comunes, en las que los desplazamientos son relativamente largos; mientras que las del tipo II son vías en las que prima la accesibilidad, vías de recreo y, en general, todas aquéllas

en las que o bien la distancia recorrida es relativamente pequeña o el objeto del viaje es turístico o de recreo.

La metodología del Manual tiene otras desventajas menores, como no indicar qué criterios concretos deben seguirse para decidir si una vía es de tipo I o II; si con estos tipos se cubren todas las carreteras convencionales; y, en general, que en todas las carreteras el NS debe ser evaluado contando con los mismos umbrales entre los diferentes niveles. Algunos ingenieros (y también algunos investigadores) han apuntado la necesidad de desarrollar conjuntos de umbrales distintos y métodos diferentes para otros tipos de carreteras, tales como carreteras de montaña, carreteras en zonas periurbanas y carreteras en áreas con un fuerte desarrollo turístico.

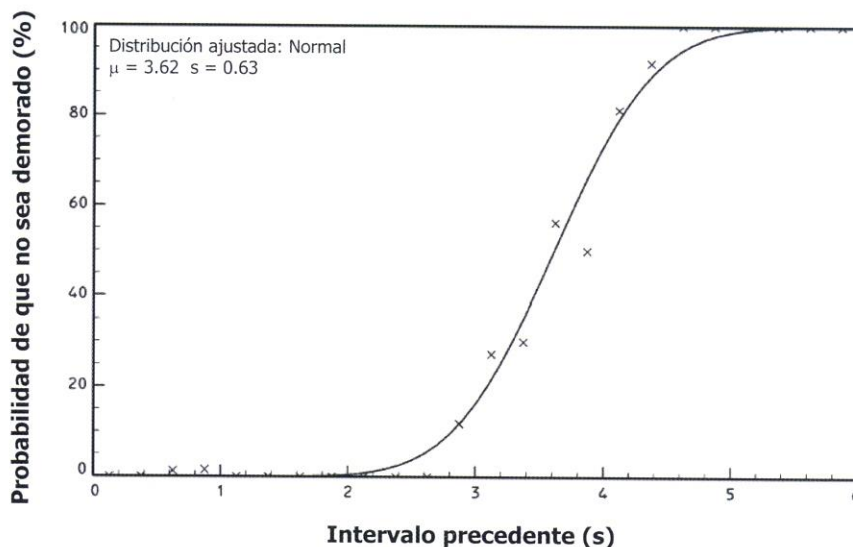


Figura 1. Función de distribución de la probabilidad de que los vehículos no sean seguidores con diferentes intervalos precedentes [Van As, 2003].

Metodología empleada en Sudáfrica

En Sudáfrica se han seleccionado variables distintas varias para estimar el nivel de servicio [Van As, 2003]. Tras un análisis de la metodología norteamericana, Van As empleó un programa de simulación macroscópica (denominado TWOLNE) para encontrar variables más acordes con el NS que se percibía en este país. Se estudió la probabilidad de que el segundo vehículo de un par fuera demorado en función del intervalo de tiempo entre ambos (véase la figura 1). A partir de este análisis se seleccionó un intervalo crítico de 3,5 segundos, de manera que todos los vehículos con un intervalo al precedente superior a este valor se consideran líderes de cola. Con esta base se separa a los usuarios en seguidores y líderes, y se optó por adoptar dos variables:

- Intensidad horaria de vehículos seguidores (esto es, cuántos vehículos son seguidores en una hora), y
- Densidad de seguidores (esto es, cuántos seguidores hay por kilómetro de vía).

De acuerdo con Van As, "el problema que surge con medidas tales como la reducción de la velocidad, el porcentaje de tiempo siguiendo y la velocidad media es que reflejan las condiciones experimentadas por cada conductor individual, y no por el conjunto de los usuarios ... Las alternativas más adecuadas son la intensidad y la densidad de demorados. La densidad de demorados tiene la ventaja de combinar en una tres variables, como la proporción de

seguidores, la intensidad y la velocidad. Por tanto, se propone a adopción de esta variable para decidir acerca de las inversiones para el incremento de la capacidad".

Otras posibles variables

En Alemania y Finlandia se emplea la velocidad media de los vehículos ligeros, descontando de la media los pesados y autobuses.

Existe una larga lista de variables que pueden emplearse para medir el NS:

- Proporción de vehículos en cola (proporción de seguidores).
- Estructura de colas (densidad de colas de tamaño 1, 2, 3, ... n).
- Distribución de colas (función de distribución de colas de tamaño 1, 2, 3, ... n).
- Intensidad de seguidores (seguidores/hora).
- Densidad de seguidores (seguidores por kilómetro por carril).
- Velocidad media (km/h).
- Reducción de la velocidad debido a la congestión (como una proporción de la velocidad libre).
- Densidad (veh/km/carril).
- Demora total (vehículos-hora por kilómetro).
- Adelantamientos, relacionando la demanda de adelantamiento con las oportunidades de adelantar.

La adopción de cualquiera de estas variables presenta ventajas e inconvenientes, y la discusión detallada de todas ellas está fuera del alcance de este artículo.

La percepción de los usuarios

¿Cuáles son las expectativas de un usuario de una carretera de dos carriles?

Cuando se les ha preguntado, los usuarios han demostrado tener un juicio sólido y fundamentado al evaluar carreteras de dos carriles, con unas expectativas razonables de cómo se espera circular por ellas. De hecho, la circulación influye en una proporción no demasiado elevada:

- Con un peso del 30% en Nueva Zelanda [McCormick et al. (1998)].
- Con un peso del 25% en una encuesta de ámbito nacional en España [Asociación Española de la Carretera (2001)].

Por ejemplo, en un estudio llevado a cabo en Nueva Zelanda en 1998, los usuarios consideraron como los factores más importantes para el nivel de servicio la circulación y el estado del firme, seguidas por la seguridad y la apariencia (probablemente refiriéndose al aspecto general de la vía y guía que puede ofrecer). En 2003, la repetición del estudio tuvo resultados distintos: la seguridad subió en el orden de prioridades, y la circulación descendió. Sin embargo, mejorar la calidad de la circulación y reducir la congestión fue la primera prioridad de los encuestados en el área de Auckland/Northland, donde 3 de cada 4 residentes designaron a la congestión como un problema con un grado de prioridad 1 ó 2.

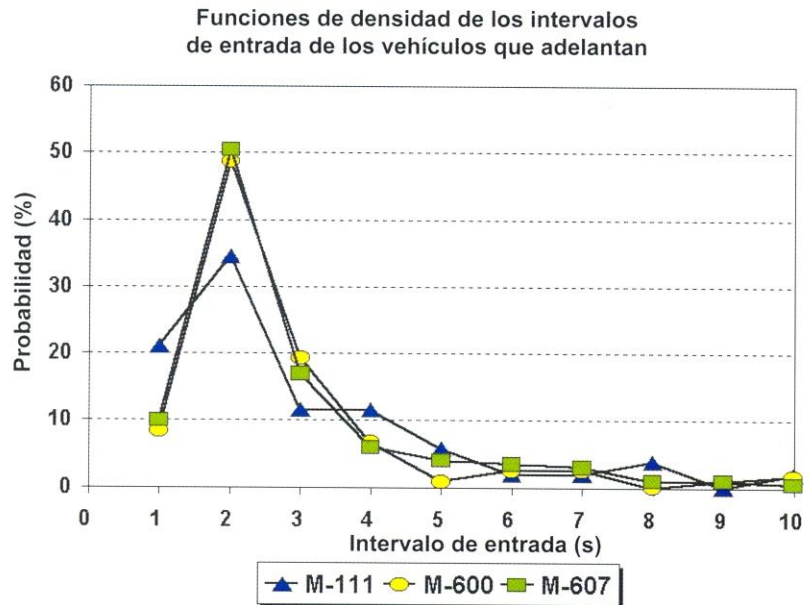


Figura 2. Funciones de densidad de los intervalos de entrada de los vehículos que adelantan.

Los usuarios comprenden que las oportunidades de adelantar están limitadas, y en general ajustan sus expectativas a las condiciones meteorológicas y de tráfico; pero sólo hasta un cierto punto, y, finalmente, son menos comprensivos con las demoras desproporcionadas que con el clima. Por ejemplo, en un estudio desarrollado en Florida, se entrevistó a grupos de usuarios que mostraron que su grado de satisfacción estaba directamente relacionado con la posibilidad de viajar a la velocidad máxima legalmente permitida en cada caso.

La información es también un aspecto importante para los usuarios. En la encuesta de 2004 realizada por la Comunidad de Madrid, el 41,5% respondió que les gustaría disponer de información actualizada sobre la red, en lo referente a tramos en obras y congestión. Como es normal, los usuarios valoran las oportunidades de adelantar, particularmente si el vehículo precedente es considerablemente más lento. En el estudio neozelandés de 1998, los usuarios mostraron las siguientes preferencias:

- Carriles adicionales (43%).
- Carriles de espera para giros (32%).
- Que las obras se lleven a cabo con molestias mínimas (25%).

Luttinen (2001) resumió un estudio realizado en Finlandia que relacionaba la percepción del usuario con las condiciones de circulación [Kiljunen y Summala, 1996, referencia original en finlandés, citado en inglés en Luttinen 2001]. El estudio partía de una clasificación de las condiciones de circulación en cinco categorías:

1. Circulación fluida: cuando la velocidad media es superior al 90% de la velocidad libre.
2. Circulación densa: cuando la velocidad media está entre el 75 y el 90% de la velocidad libre.
3. Circulación lenta: cuando la velocidad media está entre el 25 y el 75% de la velocidad libre.
4. Circulación en cola: cuando la velocidad media está entre el 10 y el 25% de la velocidad libre.
5. Circulación colapsada: cuando la velocidad media es inferior al 10% de la velocidad libre.

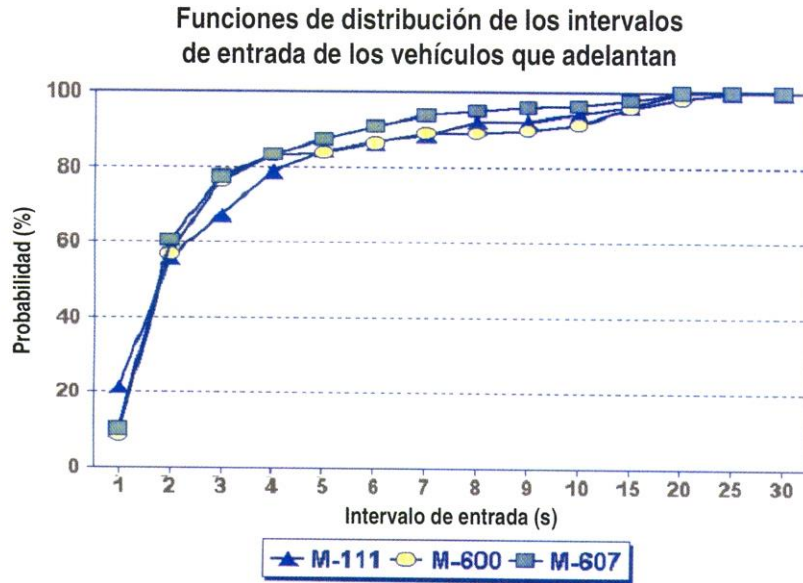


Figura 3. Funciones de distribución de los intervalos de entrada de los vehículos que adelantan.

El informe afirma que "la velocidad media de viaje (parámetro espacial) no explicaba la percepción de la calidad del tráfico mejor que los parámetros puntuales (parámetros temporales). El 50% de los conductores apreciaron que su comodidad (nivel de servicio percibido) descendía si el intervalo que les separaba del vehículo anterior era inferior a 5 s, o si la velocidad media era inferior a la deseada en más de un 8%. El resultado sugiere que la circulación no era incómoda o irritante porque aumentara la densidad, sino que estaba relacionada con factores relacionados con el propio conductor y por el comportamiento de otros conductores" [Kiljunen y Summala, 1996, referencia original en finlandés, citado en inglés en Luttinen 2001].

Estos autores concluyeron que los conductores relacionan su evaluación con las características de la vía, la velocidad, variables ambientales como la iluminación, y sus propias expectativas y contextos. Escriben que "estas observaciones dificultan la conexión entre la calidad percibida de la circulación y los niveles de servicio del Manual de Capacidad. Sugirieron que lo que se denomina circulación fluida corresponde con los NS A-C. La circulación densa se corresponde con NS O-E. El NS F incluye las circulaciones lenta, en cola y colapsada. Cuando las velocidades instantáneas se mantuvieron por encima de 77-78 km/h, la mayoría de los conductores consideraban que la circulación era fluida. La mitad de los conductores opinaron que la condición fluida se mantenía mientras que la diferencia entre la velocidad medida y la deseada era menor que 10 km/h".

¿Desean adelantar los conductores? ¿Y cuándo?

Los usuarios desean adelantar cuando opinan que la velocidad del vehículo precedente es demasiado baja, considerando las condiciones existentes. Su deseo de adelantar es mayor si creen que se puede desarrollar consistentemente una velocidad más alta que aquella con la que circula el vehículo precedente; y, al aumentar el deseo de adelantar se aproximan al vehículo precedente, reduciendo su intervalo. En conclusión, una situación en la que un vehículo más rápido circula con un intervalo al precedente corto implica que desea adelantar, y está buscando una oportunidad que pueda aprovechar.

¿Es el valor propuesto por el HCM útil para evaluar la demanda de adelantamiento? Casi toda la literatura apunta a que 3 ó 4 segundos son valores demasiado elevados para este fin. Por ejemplo, las *figuras 1 y 2* muestran las funciones de densidad y distribución de los intervalos de entrada para adelantamientos contiguos (se adelanta al vehículo precedente) en un estudio de tres carreteras en Madrid [Romana, 1999]. En los tres casos el máximo de la función de densidad está en un intervalo de 2 s. A continuación, la curva decrece hasta alcanzar un punto de máxima curvatura. Este punto no está localizado siempre en el mismo valor de intervalo; pero se encuentra entre 3 y 5 s en los datos de la carretera, 4 s en la M-500 y 3 s en la M-607.

Si se consideran las funciones de distribución, adoptar un umbral del 95 % de los adelantamientos llevaría a valores del intervalo de entre 13 y 14 s para la M-111, 14 y 15 s para la M-600 y 8 a 9 para la M-607. La diferencia entre los valores correspondientes a la M-607 y las otras vías se puede explicar basándose en la diferencia de intensidades (100-600 veh./h para la M-111 y la M-600 y hasta 1800 veh./h en la M-607). Sólo se explican alrededor del 80% de los adelantamientos con valores del intervalo de entre 3 y 5 s (4-5 s para la M-111, 3-4 s para la M-500 y 3-4 s para la M-607).

El concepto de velocidad umbral y sus ventajas

Supongamos que existe un valor de la velocidad tal que, si los conductores circulan más deprisa, consideran su velocidad aceptable (o, lo que es lo mismo, su tiempo de viaje). En este caso, se fijarían sobre todo en las condiciones de circulación en cola para determinar su nivel de servicio. En caso contrario, la velocidad baja que se ven obligados a desarrollar podría reducir la calidad de servicio que perciben, aun cuando las condiciones de circulación en cola fueran favorables. Se propone el empleo del término velocidad umbral (V_u) para esta velocidad, cuya definición podría ser "la velocidad mínima a la que los usuarios consideran aceptable viajar por un tramo de carretera de características uniformes con intensidades elevadas y circulando en colas".

Se llevó a cabo un intento de utilizar una velocidad umbral para evaluar el NS. La velocidad umbral debe reflejar las expectativas del usuario, y correspondería a las condiciones de circulación intensa, pero sin demoras apreciables. Podría corresponder a los niveles de servicio A-D, que son los correspondientes a tráfico fluido en el HCM.

El planteamiento general para medir el NS consiste en partir de las mismas variables consideradas hoy por el HCM 2000, la velocidad media y el porcentaje de tiempo siguiendo. Hay que determinar si la velocidad media (V_m) es superior o inferior a la velocidad umbral V_u . Para velocidades inferiores a la V_u el NS dependería únicamente de la velocidad. En caso contrario ($V_m > V_u$), el NS dependería únicamente del PTS, o más bien de su medida indirecta, el porcentaje de vehículos que circulan por un punto representativo de la carretera con un intervalo inferior al crítico, tomando el valor de 3 s. Probablemente sería preciso medir la V_m para vehículos ligeros, ya que los vehículos pesados tienen conductores profesionales que evalúan las rutas de manera diferente.

En la primera región ($V_m > V_u$) el NS iría de A a D, dejando los niveles D-F para la segunda región ($V_m < V_u$). Obviamente, en el punto de continuidad $V_m = V_u$, el NS correspondiente sería D.

Se ha elegido el NS D para la transición entre las variables de control, porque existe cierta evidencia (que queda sin embargo fuera del alcance de este artículo) de que la capacidad no se

alcanza en carreteras de dos carriles por sí misma; y que, cuando las velocidades caen, lo hacen debido a circunstancias externas (intersecciones, giros, rampas o empeoramientos de la sección transversal o del firme).

El establecimiento de una velocidad umbral V_u podría ayudar a desarrollar un sistema de evaluación del NS que tuviera en cuenta determinados aspectos de cada carretera. Podrían, así, separarse en cuanto a NS carreteras con una elevada proporción de tráfico circulando en colas (pero a una velocidad aceptable) de otras en las que la velocidad cae.

NS	HCM 2000 (Clase I, velocidad en km/h)	HCM 2000 (PTS en %)	Propuesto (Vel. mayor que V_u , $V_u = 80$ km/h)	Propuesto (Vel. menor que V_u , $V_u = 80$ km/h)
A	> 90	PTS ≤ 35	%DV ≤ 30	---
B	80 < V_m ≤ 90	35 < PTS ≤ 50	30 < %DV ≤ 55	---
C	70 < V_m ≤ 80	50 < PTS ≤ 65	55 < %DV ≤ 75	---
D	60 < V_m < 70	65 < PTS ≤ 80	75 < %DV	60 < V_m ≤ 80
E	40 < V_m ≤ 60	80 < PTS	---	40 < V_m ≤ 60
F	---	---	---	V_m < 40

NOTA: %VD indica porcentaje de vehículos demorados, medida indirecta de PTS según el HCM.

TABLA 2. Comparación de umbrales de NS entre HCM 2000 y el método propuesto

Ejemplo de uso de la velocidad umbral en cuatro carreteras de la Comunidad de Madrid

La velocidad umbral podría determinarse como: $V_u = V_L (1 - A)$

donde: $A = 0,08$ a $0,13$.

- 0,08: correspondiente a 8 km/h, primer valor suministrado por Kiljunen y Summala.
- 0,13: correspondiente a 10 / 77, segundo valor suministrado por Kiljunen y Summala.

La intención de este artículo no es demostrar la validez de los valores elegidos, sino explorar la posibilidad de que exista una V_u . Por el momento, este valor debería elegirse partiendo de encuestas a usuarios, o un buen juicio ingenieril. Posteriormente, y tras las investigaciones oportunas, podría establecerse un método alternativo para determinar esta V_u .

El método propuesto se ha utilizado en datos de 4 tramos de carreteras en Madrid. Las carreteras se seleccionaron buscando que discurrieran por un terreno llano u ondulado, con un trazado adecuado y una sección transversal amplia, para facilitar su comparación con las condiciones ideales del HCM.

La velocidad umbral se estimó partiendo de una velocidad libre puntual de 100 km/h.

$$V_L \text{ puntual} = 100 \text{ km/h}$$

$$V_L \text{ espacial} = 0,9 \times 100 = 90 \text{ km/h}$$

$$V_u = 0,88 \cdot 90 = 80 \text{ km/h}$$

En la *figura 4* se presenta el conjunto de umbrales de NS con $V_u = 80$ km/h. En la *figura 5* y en la *tabla 2* se muestra la comparación de los umbrales con el HCM 2000, y la *figura 6* muestra los NS resultantes de la aplicación de este criterio a los diferentes períodos en los que

se cuenta con medidas, cada uno de ellos de 5 minutos de duración. Se empleó un intervalo crítico de 4 s.

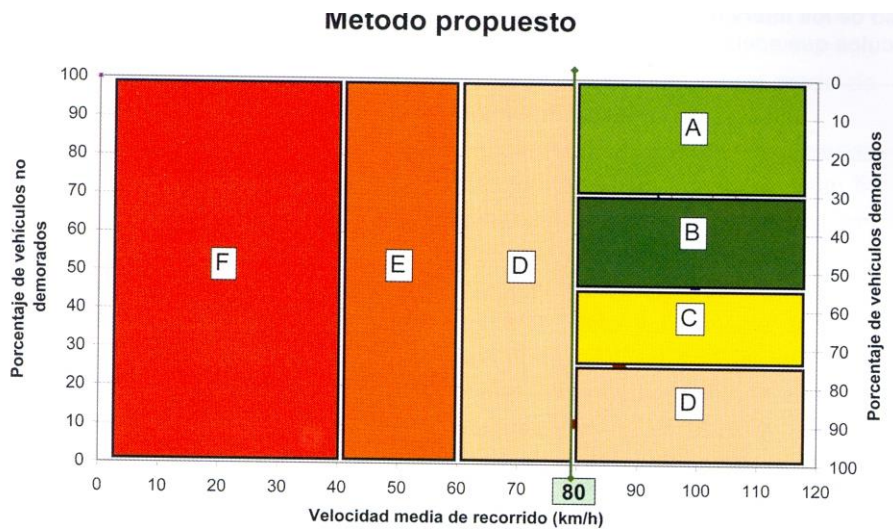


Figura 4. Un ejemplo del uso de una velocidad umbral de 80 km/h en carreteras de dos carriles en terreno llano.

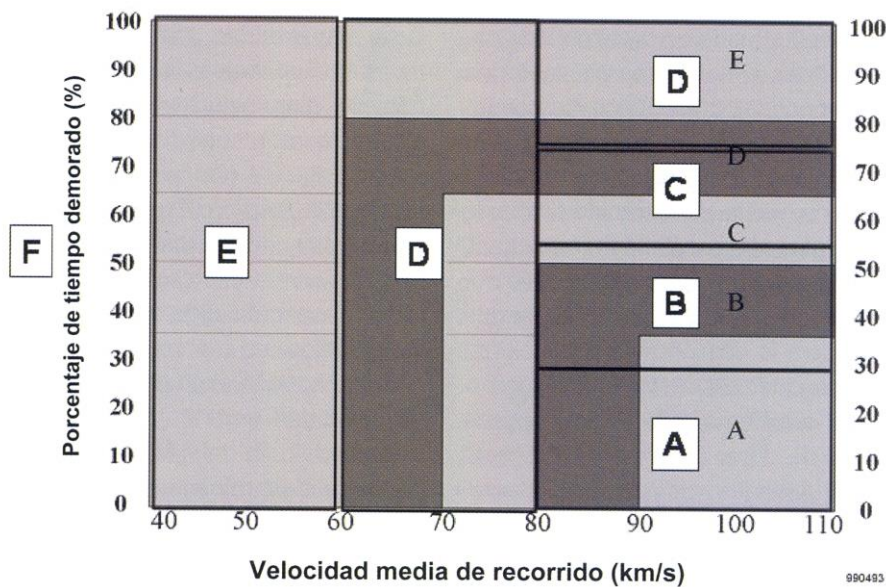


Figura 5. Comparación entre los umbrales de NS del HCM con la propuesta. Los umbrales del HCM están en mayúsculas y las regiones correspondientes en gris. Los NS propuestos están en cuadrados blancos y las regiones correspondientes en rectángulos negros. Estas regiones se aprecian mejor en la figura 4.

El valor de VL de 90 km/h se corresponde con el límite legal, y hay indicios de que esto es más o menos lo que esperan los usuarios españoles, partiendo de unas encuestas que no fueron realizadas con este fin específico de averiguar el valor de Vu.

Como puede observarse, en los datos correspondientes a las carreteras M-111 y M-500 casi todos los períodos evaluados están en un NS B. Ocasionalmente se alcanza el nivel A, y en algunos casos la VM cae, debido a la presencia de vehículos lentos (en un caso, una cosechadora que no podía ser adelantada). En estos casos el NS cae hasta D, E o incluso F en

un período de 5 minutos. En todo caso, las intensidades eran bajas y la velocidad media era reducida, pero los vehículos no circulaban en una larga cola.

Las dos carreteras tienen una intensidad media, y los resultados de NS concuerdan con lo esperado a partir de las observaciones de campo. Por otro lado, las carreteras M-501 y M-507 muestran una circulación en colas largas, pero con diferentes velocidades. El mejor NS de la M-507 es C, mientras las velocidades son aceptables (entre 70 y 80 km/h) o buenas (mayores que 80km/h). En la carretera M-501 hay largas colas (PTS > 70%), pero las velocidades son inferiores a 70 km/h. En un período PTS es el mínimo (55%), pero incluso entonces la velocidad alcanza tan sólo 70 km/h.

Una crítica habitual a esta aproximación es que puede haber un salto grande en el nivel de servicio precisamente en torno a V_u , pasando de NS A o B a D con un descenso mínimo de V_m (de 81 a 79 km/h). Sin embargo, esta posibilidad es más teórica que práctica, y esta situación probablemente denotaría que el valor de V_u no se ha elegido correctamente; o, en todo caso, que nos encontramos ante una situación excepcional.

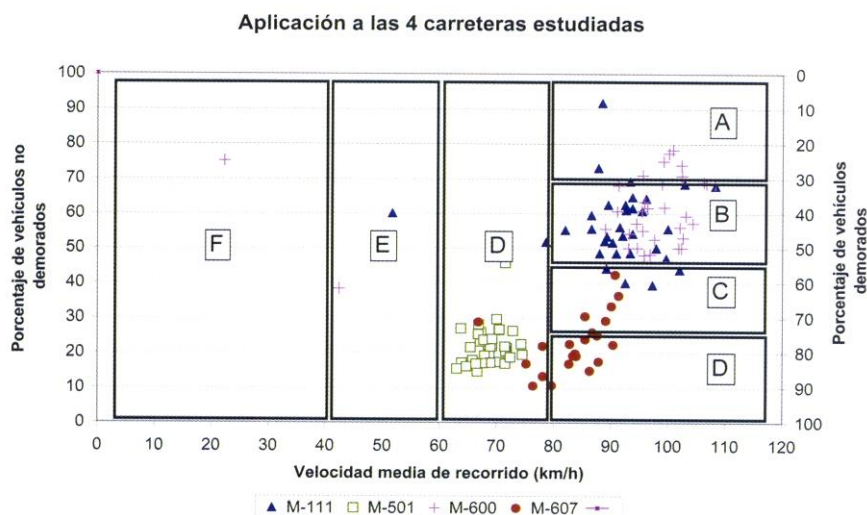


Figura 6. Un ejemplo de aplicación del método de la velocidad umbral con $V_u = 80$ km/h en cuatro carreteras de dos carriles en terreno llano y ondulado.

En casi todos los casos, los vehículos que circulen con menos del 55% de vehículos demorados viajarán claramente por encima de la velocidad umbral, y sólo se producirá un resultado por debajo de esta V_u cuando un vehículo más lento circule con una cola no demasiado larga tras él. Sólo se produciría una combinación de velocidades bajas y PTS bajos cuando exista una proporción elevada de vehículos lentos que viajan separados unos de otros, con colas cortas o nulas tras ellos. Podría corresponder a un tráfico de camiones que no desean adelantar, y esto podría resolverse siguiendo la indicación de que la V_m obtenida sea la de vehículos ligeros. Si hay un caso así, contando con la V_m de ligeros, es correcto que el NS sea reducido, ya que esa será la opinión más probable de los conductores de vehículos ligeros.

La solución a esta situación puede venir de dotar al tramo de mayores oportunidades de adelantamiento, construyendo carriles adicionales u obligando a los vehículos lentos que desarrollan colas tras ellos a parar y dejar pasar a los más rápidos, como se hace hoy en California, por ejemplo.

Resumen, conclusiones y recomendaciones

- Las carreteras de dos carriles constituyen el conjunto más variado de todos los tipos de infraestructuras para la circulación ininterrumpida. En el HCM 2000 se emplean dos variables para medir el NS: la velocidad media, V_m , y el porcentaje de tiempo siguiendo, PTS.
- En el HCM 2000 se definen dos tipos de carretera de dos carriles: tipo I, en el que las dos variables son importantes para los usuarios, y tipo II, en el que sólo el PTS es relevante. Las carreteras en las que puede ocurrir esto son las turísticas, o aquéllas en las que el tiempo de viaje por ellas es corto.
- La necesidad de disponer de dos variables simultáneas surgió de la percepción compartida por investigadores y técnicos de que los intentos anteriores de usar sólo PTS (como en el HCM 1985) o sólo la velocidad (en ediciones anteriores) no lograban captar la complejidad de la circulación en estas infraestructuras.
- Cuando se les ha preguntado, los usuarios han demostrado tener un juicio sólido y fundamentado al evaluar carreteras de dos carriles, con unas expectativas razonables de cómo se espera circular por ellas. Los usuarios saben que las oportunidades de adelantar son limitadas, y en general ajustan sus expectativas a las condiciones de circulación y climatología existentes, al menos hasta un cierto punto. Estudios realizados en Finlandia, Nueva Zelanda, España y Florida han relacionado la satisfacción de los usuarios con la circulación a una velocidad esperada, algo que podría llamarse velocidad umbral.
- Se propone el empleo del término velocidad umbral (V_u) para esta velocidad, cuya definición podría ser "la velocidad mínima a la que los usuarios consideran aceptable viajar por un tramo de carretera de características uniformes con intensidades elevadas y circulando en colas".
- La intención de este artículo no es demostrar la validez de los valores elegidos, sino explorar la posibilidad de que exista una V_u . Por el momento, este valor debería elegirse partiendo de encuestas a usuarios, o un buen juicio ingenieril. Posteriormente, y tras las investigaciones oportunas, podría establecerse un método alternativo para determinar esta V_u .
- Los usuarios desean adelantar cuando opinan que la velocidad del vehículo precedente es demasiado baja considerando las condiciones existentes. Su deseo de adelantar es mayor si creen que se puede desarrollar consistentemente una velocidad más alta que aquélla a la que circula el vehículo precedente, y al aumentar el deseo de adelantar se aproximan al vehículo precedente, reduciendo su intervalo.
- El planteamiento general para medir el NS consiste en partir de las mismas variables consideradas hoy por el HCM 2000, la velocidad media y el porcentaje de tiempo siguiendo. Hay que determinar si la velocidad media (V_m) es superior o inferior a la velocidad umbral V_u . Para velocidades inferiores a la V_u el NS dependería únicamente de la velocidad. En caso contrario ($V_m > V_u$), el NS dependería únicamente del PTS, o más bien de su medida indirecta, el porcentaje de vehículos que circulan por un punto representativo de la carretera con un intervalo inferior al crítico, tomando el valor de 3 s. Probablemente sería preciso medir V_m para vehículos ligeros, ya que los vehículos pesados tienen conductores profesionales que evalúan las rutas de manera diferente.
- El método propuesto se ha utilizado en datos de 4 tramos de carretera en Madrid. Las carreteras se seleccionaron buscando que discurrieran por un terreno llano u ondulado, con un diseño geométrico adecuado y una sección transversal amplia, para facilitar su comparación con las condiciones ideales del HCM.

- Como puede observarse, en dos carreteras casi todos los períodos evaluados están en un NS B. Ocasionalmente se alcanza el nivel A, y en algunos casos la Vm cae, debido a la presencia de vehículos lentos (en un caso, una cosechadora que no podía ser adelantada). En estos casos el NS cae hasta D, E o incluso F en un período de 5 minutos. En todo caso, las intensidades eran bajas y la velocidad media era reducida, pero los vehículos no circulaban en una larga cola. Las dos carreteras tienen una intensidad media, y los resultados de NS concuerdan con lo esperado a partir de observaciones de campo.
- Por otro lado, las carreteras M-501 y M-507 muestran una circulación en colas largas, pero con diferentes velocidades. El mejor NS de la M-507 es C, mientras las velocidades son aceptables (entre 70 y 80 km/h) o buenas (mayores que 80 km/h). En la carretera M-501 hay largas colas (PTS > 70%), pero las velocidades son inferiores a 70 km/h. En un período PTS es el mínimo (55 %), pero incluso entonces la velocidad alcanza tan sólo 70 km/h, mereciendo una evaluación de NS D.
- El establecimiento de una velocidad umbral Vu podría ayudar a desarrollar un sistema de evaluación del NS que tuviera en cuenta determinados aspectos de cada carretera. Podrían así separarse en cuanto a NS carreteras con una elevada proporción de tráfico circulando en colas, pero a una velocidad aceptable, de otras en las que la velocidad cae.
- La velocidad umbral es un concepto cercano a los usuarios, y su aplicación da resultados consistentes con las condiciones de la circulación. Podría ayudar a distinguir umbrales diferentes en tipos de vía diferentes.
- Es necesaria más investigación para desarrollar métodos consistentes para establecer el valor de Vu en diferentes carreteras.

Bibliografía

1. TRB. *Highway Capacity Manual 2000. Metric version*. Transportation Research Board, Washington, D.C., 2000.
2. VAN AS, C. *The development of an analysis method for the determination of level of service of two-lane undivided highways in South Africa. PROJECT SUMMARY*. South African National Roads Agency Limited, 2003.
3. HARWOOD, DW., MAY, A.D., ANDERSON, LB., LEIMAN, L. and ARCHILLA, A.R. *Capacity and Quality of Service of Two-Lane Highways*. Final Report. Midwest Research and UC Berkeley, for NCHRP 3-55, 1999.
4. GUELL, D.L., VIRKLER, M.R. *Capacity Analysis of Two-Lane Highways*, In Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No.1194, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1988.
5. ROMANA, M. G. *Evaluación práctica de niveles de servicio en carreteras convencionales de dos carriles en España*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 1995.
6. McCORMICK, M., GIBSON, R. et al. *State Highway Satisfaction Survey. September 1998*. Research report prepared for Transit New Zealand. Transit New Zealand and AC Nielsen, 1998.
7. ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE LA CARRETERA. *La Red de Carreteras Locales de España*. Documentos técnicos del XVI VYODEAL (León, 7 al 11 de mayo de 2001).
8. COMUNIDAD DE MADRID. *Encuesta de la Dirección General de Carreteras de la Comunidad de Madrid a los usuarios de las carreteras autonómicas*. Madrid. No publicado, 2004.
9. LUTIINEN, R.T (2001): *Capacity and Level of Service on Finnish Two-Lane Highways*. Helsinki. Finnish Road Administration, Traffic and Road Engineering. Finnra Reports 18/2001, ISBN 951-726-748-7, ISSN 1457 -9871, TI EH 3200665E.

10. ROMANA, M.G. (1999) *Passing Activity on Two-Lane Highways in Spain*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No.1678, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 2003.