

TÍTULO: RECOMENDACIONES PARA LA APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DEL HCM PARA INTERSECCIONES NO SEMAFORIZADAS EN ARGENTINA.

NOMBRE Y APELLIDO DE LOS AUTORES:

**Inga. Violeta DEPIANTE
Ing. Jorge GALARRAGA**

DIRECCIÓN POSTAL COMPLETA:

**Maestría en Ciencias de la Ingeniería con Mención en Transporte de la Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba.
Avenida Vélez Sarsfield 1611, Ciudad Universitaria, X5016, Córdoba, Argentina**

NÚMERO DE TELÉFONO Y FAX:

**TE: 54 – 351 – 4334149
FAX: 54 – 351 – 4334150**

DIRECCIÓN DE CORREO ELECTRÓNICO:

**vdepiante@yahoo.com
jorgala@efn.uncor.edu**

ÁREA TEMÁTICA PROPUESTA:

Gerenciamiento de Redes Viales

RECOMENDACIONES PARA LA APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DEL HCM PARA INTERSECCIONES NO SEMAFORIZADAS EN ARGENTINA

RESUMEN

El Manual de Capacidad de Carreteras compendio de años de investigación empírica y teórica realizada en Estados Unidos de Norteamérica, en su versión del año 2010 (HCM2010), contiene una detallada metodología para calcular la capacidad y el nivel de servicio en intersecciones controladas por dos señales de pare (TWSC - Capítulo 19).

Su funcionamiento es similar al de intersecciones de una calle principal con una secundaria existente en nuestra realidad. Dentro de su metodología presenta valores de parámetros basados en datos empíricos y modelos de simulación considerando comportamiento de los conductores, vehículos tipo, regulación y control del país de origen.

Desde hace varios años el grupo de trabajo ha venido realizando estudios relacionados con la adaptación de modelos de tránsito y transporte a las características propias de circulación en nuestra realidad, con el objetivo de poder estimar más adecuadamente las medidas de eficiencia correspondientes a las condiciones locales.

En intersecciones no semaforizadas el tránsito que pretende ingresar por la calle secundaria debe dar prioridad al de la principal, a excepción de que encuentre un intervalo suficientemente grande que le permita realizar la maniobra deseada. El tema se trata mediante la teoría de aceptación de intervalos. El intervalo crítico (t_c) y el de seguimiento (t_f) resultan claves para estimar correctamente la capacidad y el nivel de servicio. Estos valores dependen del comportamiento de los conductores.

El presente trabajo presenta una breve descripción del procedimiento empleado en el HCM 2010 y sus principales diferencias con el HCM2000, para luego referir los estudios realizados para estimar los valores de t_c y t_f para los diferentes movimientos posibles de ingreso desde la secundaria (giro hacia la derecha, hacia la izquierda y pasante) en la ciudad de Córdoba. Finalmente se efectúan las recomendaciones consideradas pertinentes para permitir una mejor aplicación a las condiciones locales del tránsito.

1.INTRODUCCION

El análisis de capacidad en intersecciones no semaforizadas se basa en una cabal caracterización y entendimiento de la interacción entre dos corrientes de tránsito conflictivas (Kyte et al., 1996; Troutbeck y Brilon, 1996). La mayoría de los procedimientos de análisis de capacidad en las intersecciones no semaforizadas se basan en modelos estocásticos como lo es por ejemplo la teoría de aceptación de intervalos. Según este modelo la capacidad es una función dependiente de la disponibilidad de intervalos. Esta metodología fue desarrollada en Alemania por Harders en 1968 y por Sieglöch en 1973 (Luttinen, 2003). Tanto los manuales de capacidad de Alemania como el de Estados Unidos de Norteamérica y el Suizo contemplan este criterio. En Inglaterra los análisis de capacidad se basan en modelos estadísticos con ecuaciones de regresión empíricas como las de Kimber y Coombe desarrolladas en 1980 (Lutinen, 2006). Este método puede modelar condiciones de elevada congestión.

Los modelos de capacidad basados en el proceso de aceptación de intervalos se derivan de un modelo de colas simple en donde se considera el cruce de dos corrientes de tráfico: (1) una corriente prioritaria o principal y (2) otra corriente secundaria o no prioritaria. Los vehículos de la corriente principal no presentan demoras y a los de la secundaria sólo se les permite ingresar a la zona de conflicto si el siguiente vehículo de la calle principal está todavía al menos a un cierto intervalo en segundos. En caso contrario el vehículo de la secundaria debe esperar.

La teoría de la aceptación de intervalos supone que existe un intervalo mínimo que todos los conductores de la corriente secundaria aceptarán en similares intersecciones: el intervalo crítico (t_c). De acuerdo al modelo de comportamiento normalmente utilizado, ningún conductor entrará en la intersección a menos que el intervalo que tenga en la corriente principal sea igual o mayor al intervalo crítico. También se asume que si se presenta un intervalo muy largo en la corriente principal, dos o más conductores del acceso secundario podrían emplearlo para entrar en la misma. La separación, medida en tiempo, entre vehículos de la corriente secundaria que aprovechan un mismo intervalo se conoce como tiempo de seguimiento (t_f). En ambos casos se estiman valores medios a partir de una muestra, y se los considera como representativos de la población. La exactitud en la estimación de la capacidad está fuertemente influenciada por la precisión de los valores de t_c y t_f .

El Manual de Capacidad de Carreteras en su versión del año 2010 (TRB, 2010) trata las intersecciones no semaforizadas basado en el método de aceptación de intervalos y contiene una detallada metodología para calcular la capacidad y el nivel de servicio en intersecciones controladas por dos señales de pare (Capítulo 19: TWSC). Define la capacidad para cada movimiento en la intersección bajo condiciones de circulación de Estados Unidos de Norteamérica.

Las intersecciones no semaforizadas de una avenida importante con una calle local en Argentina reproducen adecuadamente este funcionamiento, ya que el tránsito de la avenida tiene prioridad permanente (salvo para girar a la izquierda, si es de doble sentido) y los que

deben aguardar por un intervalo adecuado son los conductores que llegan por la calle secundaria en correspondencia con el funcionamiento de intersecciones controladas por dos señales de pare

2. MANUAL DE CAPACIDAD HCM2010

El Manual de Capacidad de Carreteras es un compendio de investigaciones teóricas y empíricas realizadas en Estados Unidos de Norteamérica a lo largo de muchos años en materia de los distintos componentes de la infraestructura vial. Desde 1950, cuando salió la primera edición, hasta el día de hoy en sus versiones 1965, 1985, 1994 y 2000 ha ido modificando y ampliando las metodologías involucradas.

A partir de su versión del año 1985 el manual presenta una metodología (Capítulo 10) para intersecciones no semaforizadas, pero a diferencia de los restantes capítulos, basados en proyectos financiados por el estado, este capítulo basó su procedimiento en metodologías desarrolladas originalmente en Alemania, con escasa calibración para las condiciones de circulación norteamericanas. En su versión de 1994 se corrigieron algunas de esas deficiencias y se introdujo en el cálculo una fórmula de demora. Igualmente no se corrigieron todas estas falencias, y los procedimientos no se calibraron con una base de datos propia que reflejara el comportamiento de los conductores norteamericanos. La metodología no contemplaba, por ejemplo, que el arribo de vehículos sobre la calle principal fuera en pelotón.

En enero de 1993 la Universidad de Idaho en cooperación con Kittelson y Asociados, la Universidad de Ruhr y la Universidad de Tecnología de Queensland iniciaron el llamado proyecto NCHRP 3-46 (Kyte et al., 1996) financiado por la FWHA, de investigación y desarrollo de nuevos procedimientos y metodologías para el análisis de intersecciones no semaforizadas. Se confeccionó una base de datos propia de 79 lugares obteniéndose un total de 128 horas de filmación con información recolectada en Estados Unidos de Norteamérica. En general muchos de los trabajos posteriores se basaron en este, que recopiló en cierta manera investigaciones anteriores realizadas en Alemania, Australia, Suiza y el mismo Estados Unidos al estar el equipo de trabajo conformado por especialistas de los distintos países. Al haber sido concebida desde el inicio como un crisol de metodologías ya existentes, se considera que este trabajo contempla la metodología más empleada y resultó ser el pilar metodológico y con base de datos propia para la confección de los HCM2000 y 2010 adaptando parámetros a la realidad local tanto de intervalos críticos como de capacidad. Los resultados de este megaproyecto sentaron las bases del Capítulo 19 junto con otros estudios para contemplar situaciones diferentes de las condiciones base. En esta nueva versión, más inclusiva, se tuvieron en cuenta muchos de los desarrollos en las metodologías ya estudiadas en Alemania, Suiza y Australia con anterioridad

Desde el Proyecto 3-46 los aportes nuevos no hay sido muchos excepto algunos trabajos del mismo equipo y sus sucesores relacionados con observaciones realizadas en campaña que no representan las condiciones base supuestas en la metodología. Por ejemplo, la prioridad relativa de los vehículos de la calle principal (Troutbeck y Kako, 1999). En este trabajo se analiza el efecto que tiene sobre la capacidad el hecho de que un vehículo de la

calle secundaria ingrese a la misma con un intervalo menor al crítico obligando a vehículos de la principal a frenar para que aquel pueda completar la maniobra, con lo cual el supuesto de prioridades relativas no se estaría cumpliendo. También Troutbeck presenta en otro de sus trabajos (Troutbeck y Brilon 1996) la utilización de otras distribuciones de frecuencias para los intervalos concluyendo que la exponencial negativa utilizada resulta bastante adecuada. Brilon y otros (Brilon et al., 1996, Brilon y Wu, 2003) tratan el procedimiento de corrección de capacidad para considerar el cruce en dos etapas, debido a la existencia de una mediana física que puede almacenar vehículos durante el cruce basados en los estudios del proyecto 3-46.

En el HCM2010 la capacidad de un movimiento en una intersección no semaforizada está definida por el modelo de aceptación de intervalos. La capacidad depende de la cantidad de tránsito con el que deba enfrentarse el conductor de la secundaria para poder realizar el movimiento deseado, es decir del tránsito que está en conflicto con dicho movimiento y de los intervalos disponibles dentro de esa corriente como así también de su distribución y de las decisiones de los conductores sobre la secundaria. Según este modelo la calle secundaria observa la principal como una “oferta continua” de intervalos disponibles potencialmente utilizables (Luttinen, 2003). En definitiva la capacidad de un movimiento dependerá del volumen conflictivo al movimiento, el intervalo de aceptación y el de seguimiento.

El modelo establece, en primera instancia un orden de prioridades de los distintos movimientos posibles dentro de la intersección. Los conductores deben respetar los derechos de paso de otros conductores, es decir ceder el paso ante quien corresponda. El modelo de aceptación de intervalos presentado define cuatro niveles de prioridad, por lo que las corrientes de tránsito se pueden clasificar en:

De prioridad 1: Tiene prioridad absoluta y no tiene que ceder el paso a ninguna corriente vehicular, son los movimientos pasantes y giros a la derecha desde la principal.

De prioridad 2: Tiene que ceder el paso a la corriente de prioridad 1, son giros a la izquierda desde la principal (GIP), giros en U desde la principal (GU) y giros a la derecha desde la secundaria (GD).

De prioridad 3: Tiene que ceder el paso a la corriente de prioridad 2 y por ende a la corriente de prioridad 1, son los movimientos pasantes (P) desde la secundaria.

De prioridad 4: Tiene que ceder el paso a la corriente de prioridad 3 y por lo tanto también a la corriente de prioridad 2 y a la corriente de prioridad 1, son los giros a la izquierda desde la secundaria (GI).

Según lo planteado los conductores deben esperar por una oportunidad en la corriente de tránsito conflictivo segura para poder entrar a la intersección salvo la corriente de Prioridad 1 que posee paso en forma permanente en el tiempo.

La Figura 1 esquematiza los tipos de intersecciones e identificación de movimientos empleada en el HCM2010 para definir las prioridades de cada uno. Se presentan dos tipos de intersecciones, en cruz y de tres ramas. El nuevo Manual contempla también la existencia de movimientos en U sobre la calle principal no considerados en el HCM2000.

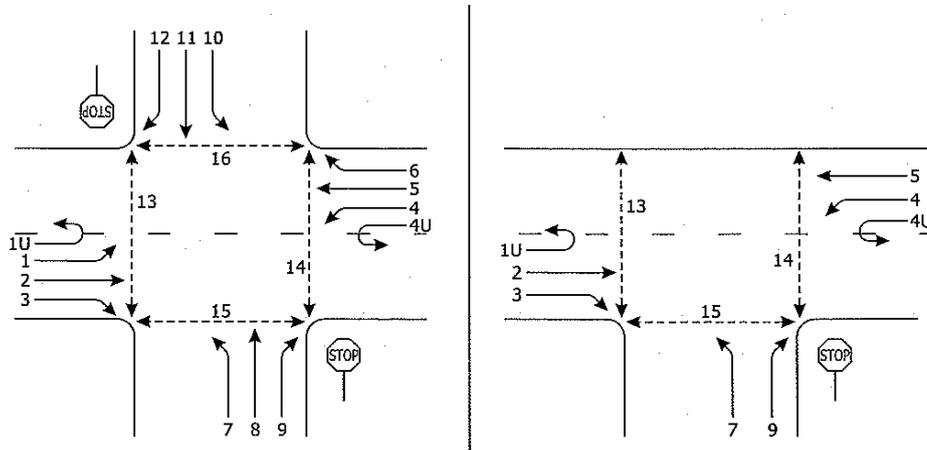


Figura 1. Movimientos existentes en una intersección no semaforizada
(Fuente: HCM2010)

Para el cálculo de capacidad propone un modelo de aceptación de intervalos que define la capacidad potencial o capacidad teórica presentada en la Ecuación 1, para cada uno de los movimientos de la calle secundaria, en donde la distribución de los intervalos sigue una función exponencial negativa.

$$c_{p,x} = v_{c,x} \frac{e^{-\frac{v_{c,x} t_{c,x}}{3600}}}{1 - e^{-\frac{v_{c,x} t_{f,x}}{3600}}} \quad (1)$$

donde:

- $c_{p,x}$ = capacidad potencial del movimiento "x" (vph),
- $v_{c,x}$ = flujo conflictivo para el movimiento "x" (vph),
- $t_{c,x}$ = intervalo crítico para el movimiento "x" (s),
- $t_{f,x}$ = tiempo de seguimiento para el movimiento "x" (s).

La capacidad potencial viene definida para un tipo de movimiento dado desde la secundaria pero asumiendo las siguientes condiciones base:

- El tránsito de las intersecciones aledañas no afecta a la intersección en cuestión
- Cada movimiento desde la secundaria tiene su propio carril es decir no se comparten los movimientos
- El patrón de llegadas desde la calle principal no está afectado por la presencia de una intersección semaforizada próxima
- Ningún otro movimiento de Prioridad 2, 3 y 4 impide el movimiento en cuestión

Intervalos superiores al crítico pueden ser utilizados por más de un vehículo de la calle secundaria. Puede verse que la función exponencial del numerador indica la probabilidad de encontrar un intervalo superior al intervalo crítico en la corriente principal y que también se puede determinar la probabilidad de encontrar intervalos superiores en un número determinado de intervalos de seguimiento y obtener así la capacidad total del acceso desde la secundaria, dada por el valor esperado del vehículos que potencialmente podrían utilizar los distintos intervalos de distintos tamaños disponibles en la corriente principal.

En su metodología el HCM2010 ofrece valores correspondientes a intervalos críticos y de seguimiento en condiciones base, para diferentes tipos de movimientos en intersecciones de calles principales con secundarias reguladas por señal de Pare, obtenidos empíricamente para conductores de Estados Unidos de Norteamérica es decir, dependientes del comportamiento de los conductores y de los tipos de vehículos. Las Tablas 1 y 2 presentan los valores propuestos por el HCM2010. En la Tabla 1 referida a intervalos críticos, a diferencia del HCM2000 se considera también el caso de que la calle principal sea de seis carriles además de dos y cuatro.

Tabla 1. Intervalos críticos base del HCM2010

Movimiento	Para dos carriles en la principal (s)	Para cuatro carriles en la principal (s)	Para seis carriles en la principal (s)
GIP	4.1	4.1	5.3
GU	NA	6.4 (carril ancho) 6.9 (carril angosto)	5.6
GD	6.2	6.9	7.1
P	1 etapa: 6.5 2 etapas: PRIMERA: 5.5 2 etapas: SEGUNDA: 5.5	1 etapa: 6.5 2 etapas: PRIMERA: 5.5 2 etapas: SEGUNDA: 5.5	1 etapa: 6.5* 2 etapas: PRIMERA: 5.5* 2 etapas SEGUNDA: 5.5*
GI	1 etapa: 7.1 2 etapas: PRIMERA: 6.1 2 etapas: SEGUNDA: 6.1	1 etapa: 7.5 2 etapas: PRIMERA: 6.5 2 etapas: SEGUNDA: 6.5	1 etapa: 6.4 2 etapas: PRIMERA: 7.3 2 etapas: SEGUNDA: 6.7

Nota: (*) Usar con precaución valores estimativos, no calculados

Cuando se habla de cruce en etapas se refiere a la existencia de una bahía de almacenamiento de vehículos que acceden a la intersección por la calle secundaria en donde el conductor tiene la posibilidad de realizar el cruce de dos corrientes de tránsito conflictivo en forma independiente permitiendo de esta manera un incremento en los valores de capacidad. A diferencia de su versión de 2000 se incluyen en la Tabla 1 los valores correspondientes de intervalo crítico para el cruce en una o dos etapas (primera y segunda etapa). La anterior versión consideraba correcciones de los intervalos por cruce en etapas.

Merece un comentario especial el hecho de que los intervalos críticos correspondientes al giro a la izquierda desde la calle secundaria en el caso de seis carriles presente un valor inferior en el cruce en una etapa que para cada etapa en el cruce en dos etapas. Esto mereció una consulta a los responsables de las ediciones que no fue respondida. El manual hace un comentario referido a que en calles principales de seis carriles se observaron ingresos desde la secundaria aun cuando se observaran movimientos conflictivos en el carril más alejado de la principal.

La Tabla 2 muestra los valores correspondientes a los intervalos de seguimiento.

Tabla 2. Intervalos de seguimiento base del HCM2010

Movimiento	Para dos carriles en la principal (s)	Para cuatro carriles en la principal (s)	Para seis carriles en la principal (s)
GIP	2.2	2.2	3.1
GU	NA	2.5 (carril ancho) 3.1(carril angosto)	2.3
GD	3.3	3.3	3.9
P	4	4	4
GI	3.5	3.5	3.8

La metodología propone también una serie de correcciones para ajustar los valores de intervalos base por la falta de cumplimiento de las condiciones base, como son la suposición de que la corriente vehicular se encuentra solamente conformada por vehículos livianos, la falta de circulación en terreno llano, una intersección en T de tres accesos en lugar de cuatro. Para un movimiento determinado "x" las Ecuaciones 2 y 3 indican las correcciones por presencia de vehículos pesados, existencia de pendiente e intersección de tres ramas dadas por

$$t_{c,x} = t_{c,base} + t_{c,HV} PHV + t_{c,G} G - t_{3,LT} \quad (2)$$

$$t_{f,x} = t_{f,base} + t_{f,HV} PHV \quad (3)$$

donde:

- $t_{c,x}$ = intervalo crítico para el movimiento "x" desde la secundaria (s),
- $t_{f,x}$ = intervalo de seguimiento para el movimiento "x" desde la secundaria (s),
- $t_{c,base}$ = intervalo crítico base (s),
- $t_{f,base}$ = intervalo de seguimiento base (s),
- $t_{c,HV}$ = factor de ajuste por vehículos pesados (1.0 para calle principal de dos carriles, 2.0 para cuatro carriles en la calle principal) (s),
- $t_{f,HV}$ = factor de ajuste por vehículos pesados (0.9 para calle principal de dos carriles, 1.0 para cuatro carriles en la calle principal) (s),

PHV = proporción de vehículos pesados del movimiento en la calle secundaria,
 $t_{c,G}$ = factor de ajuste por pendiente (0.1 para el movimiento 9 y 12 y 0.2 para los movimientos 7, 8, 10 y 11) (s),
G = porcentaje de pendiente (%),
 $t_{3,LT}$ = factor de ajuste por la geometría de la intersección (0.7 para giro a la izquierda desde la secundaria, "0" en los otros casos) (s).

Las correcciones no contemplan el cruce en etapas como en la versión HCM2000 que según ya se mencionó están incluidas directamente en los valores de intervalos base que propone.

3. INTERVALOS CRÍTICOS, DE SEGUIMIENTO Y CAPACIDAD

Dado que el conductor en una intersección no semaforizada debe enfrentarse a la decisión de cuando ingresar a la misma y a la de definir el momento en que resulta seguro hacerlo, el comportamiento del mismo es una variable que mayormente afecta la operación en la intersección y por lo tanto se hace necesario una calibración para tener en cuenta el comportamiento local para realizar estimaciones de capacidad acertadas (NCHRP 572, 2007), además del hecho de que los vehículos responden de una manera diferente y las reglamentaciones y su grado de cumplimiento tampoco sean las mismas.

Esta diferencia planteada coincide con resultados obtenidos por el equipo de investigación desde hace varios años en el sentido de que los conductores en Argentina presentan diferencias en el comportamiento al ser en general mucho más agresivos en la conducción que los norteamericanos, además de que existen también diferencias en los vehículos utilizados, en las reglamentaciones y en el respeto a las mismas.

Estudios de estimación de intervalos críticos y de seguimiento y de capacidad realizados para cada movimiento y número de carriles de la principal en diferentes intersecciones de la ciudad han permitido establecer valores que difieren de los propuestos por el HCM 2010 (Galarraga, 2005).

También se observa que para los flujos peatonales, las prioridades son diferentes a las mencionadas para el HCM2010. En Argentina el peatón es el que siempre tiene prioridad sobre los flujos vehiculares, aunque esta prioridad en la práctica no se cumpla, en algunos casos hasta en más del 50% (Depiante et al, 2007).

En el HCM2010 se deja claro que los valores de intervalos críticos y de seguimiento están basados en estudios realizados a lo largo de Estados Unidos y que son representativos de un rango de condiciones muy amplio. Acota también que si se observan valores de intervalos críticos más bajos la capacidad se incrementará y viceversa. Deja claro que estos intervalos son de importancia capital en la definición de la capacidad teórica de la intersección por lo que el trabajo se concentra en la estimación de estos dos valores principalmente además de algunas otras consideraciones menores.

Para estimar estos intervalos se han desarrollado numerosos estudios y técnicas pero cabe mencionar que existen básicamente dos grandes grupos de metodologías para la estimación del intervalo crítico y del tiempo de seguimiento ya sea en forma conjunta o en forma independiente. Unos, Sieglöch, lo hacen en forma conjunta y determinan ambos intervalos a la vez utilizando técnicas de regresión, mientras que otros, Asworth, Troutbeck, calculan los valores medios esperados del intervalo crítico y del tiempo de seguimiento por separado empleando métodos probabilísticos. Entre ellos, el método de Máxima Verosimilitud para el intervalo crítico ha mostrado ser el más exacto y confiable (Tian et al., 1999).

El método para la estimación de los intervalos críticos y de seguimiento en forma conjunta de Sieglöch es bastante confiable y simple pero aplicable en condiciones de saturación, es decir una cola continua sobre el ingreso por la calle secundaria. Se basa en el análisis de regresión del número de vehículos que utilizan un mismo intervalo versus el tamaño del intervalo. Con esto se determina tanto el intervalo crítico como el intervalo de seguimiento. Siempre que exista cola en la calle secundaria (de al menos un vehículo) el método propuesto por Sieglöch proporciona resultados aceptables (Kyte et al., 1996). El procedimiento incluye los siguientes pasos:

- Registrar para cada tamaño de intervalo “ t ”, el número de vehículos “ i ” que ingresan en ese intervalo
- Calcular el tamaño promedio del intervalo $E(t)$ para cada uno de los intervalos aceptados por solamente “ n ” vehículos
- Ajustar una regresión lineal entre los valores promedios de tamaño de intervalo $E(t)$ (como variable dependiente) y el número de vehículos que ingresan durante este tamaño promedio de intervalo, “ n ” (como variable independiente)
- La pendiente de la recta de regresión es el valor estimado para el tiempo de seguimiento (t_f), ya que representa el tiempo que agrega el paso de un vehículo más de “ i ” a “ $i+1$ ”
- El intervalo de aceptación crítico se calcula como la ordenada al origen (t_0) más la mitad del tiempo de seguimiento, ya que con menos de ese valor no entra ningún vehículo

Si por la calle secundaria no se observa formación continua de cola, que es el caso más frecuente, no se puede aplicar el método de regresión lineal debido a que los intervalos de la corriente principal no serían completamente aprovechados y en consecuencia se deben emplear otras metodologías.

Entonces el método de regresión no se puede aplicar si no existe cola continua. En estos casos es necesario aplicar un método probabilístico. Troutbeck (1992) describe un procedimiento de estimación de intervalos críticos mediante máxima verosimilitud. Este procedimiento permite la estimación bajo condiciones de tráfico que no sean sobresaturadas. El intervalo crítico de cada conductor se encuentra entre el intervalo máximo rechazado y el intervalo aceptado por él mismo. Si el intervalo aceptado fuera inferior al máximo rechazado se considera que el conductor está desatento. Este procedimiento requiere asumir como primera medida una distribución probabilística de los valores de intervalo crítico para la población de conductores. Para la mayoría de los casos

es razonable y aceptado en muchos estudios asumir una distribución log-normal, ya que está sesgada hacia la derecha y no presenta valores negativos. Conceptualmente este método permite ajustar una distribución de probabilidades a una muestra de datos.

Considerando la siguiente notación:

a_i = logaritmo del intervalo aceptado por el i -ésimo conductor

r_i = logaritmo del máximo intervalo rechazado por el i -ésimo conductor

μ y σ^2 = media y varianza de los logaritmos de los intervalos críticos de los conductores individuales (considerando una distribución log-normal); y

$f(\cdot)$ y $F(\cdot)$ la función de densidad de probabilidad y la función de frecuencias acumuladas respectivamente para la distribución normal.

La probabilidad de que el intervalo crítico de un conductor individual se ubique entre r_i y a_i es $F(a_i) - F(r_i)$. Si realizamos la sumatoria de todos los conductores, la verosimilitud de una muestra de "n" conductores que posean intervalos aceptados y máximos rechazados de (a_i, r_i) obtenemos:

$$\prod_{i=1}^{i=n} [F(a_i) - F(r_i)] \quad (4)$$

El logaritmo, L de esta probabilidad es:

$$L = \sum_{i=1}^{i=n} \ln [F(a_i) - F(r_i)] \quad (5)$$

Los estimadores de máxima verosimilitud, μ y σ^2 , que maximizan L, están dados por la solución de las ecuaciones:

$$\delta L / \delta \mu = 0 \quad \text{y} \quad \delta L / \delta \sigma^2 = 0 \quad (6)$$

La resolución simultánea de estas ecuaciones permite obtener la media $E(t_c)$ y la varianza $Var(t_c)$ de la distribución del intervalo crítico que viene expresada en función de los parámetros de la distribución log-normal hallados como:

$$E(t_c) = e^{[\mu + 0.5\sigma^2]} \quad (7)$$

$$Var(t_c) = E(t_c)^2 e^{[\sigma^2]} \quad (8)$$

El intervalo crítico utilizado en los cálculos de aceptación de intervalos es entonces igual a $E(t_c)$. El valor debería ser inferior a la media de los intervalos aceptados. La información utilizada es la máxima al incluir el efecto de un número grande de intervalos rechazados. Pero no pueden ser incluidos entre los datos, los conductores que aceptan el primer intervalo que se les presenta sin rechazar ninguno. El método de Máxima Verosimilitud contempla situaciones tan diversas en cuanto al volumen de la corriente conflictiva como a la distribución de los intervalos en la misma.

Para la estimación del tiempo de seguimiento puede calcularse el intervalo promedio entre vehículos en cola en la calle secundaria que cruzan la intersección durante los intervalos más prolongados de la corriente principal, es decir se deben medir los tiempos entre vehículos que utilizan el mismo intervalo en la corriente principal en condiciones de cola continua. Si el vehículo no se encontrara en cola, no se lo consideraría en los cálculos. El procedimiento es análogo al que se emplea para calcular la tasa de flujo de saturación en intersecciones semaforizadas (TRB, 2010).

La forma del modelo de capacidad propuesto por el HCM2010 y mostrado en la Ecuación 1 puede transformarse y observar la similitud con el modelo de regresión exponencial de Sieglöch (Kyte et al, 1996) y propuesto para rotondas (NCHRP, 2007) que se presenta en la Ecuación 9.

$$C_{p,x} = \frac{3600}{t_{f,x}} e^{-\left(\frac{t_{c,x}-t_{f,x}/2}{3600}\right)v_{c,x}} \quad (9)$$

que es de la forma:

$$C_{p,x} = Ae^{-Bv_{c,x}} \quad (10)$$

donde:

$$A = \frac{3600}{t_{f,x}} \quad (11)$$

$$B = \frac{t_{c,x}-t_{f,x}/2}{3600} \quad (12)$$

Dicha relación permite obtener la capacidad potencial a partir de flujo conflictivo si se tienen en cuenta las calibraciones de los parámetros A y B.

4. ESTUDIOS LOCALES

A manera de ejemplo local de estimación de intervalo crítico y tiempo de seguimiento mediante el modelo de regresión lineal propuesto por Sieglöch se presentan los resultados obtenidos sobre una base de 71 casos de medición para el estudio de una intersección de tres ramas de la ciudad que se ajusta a los patrones de condiciones base del HCM2010 (Depiante, 2011). Los resultados corresponden al movimiento de giro a la izquierda de la calle secundaria.

En la Figura 2 se presentan los datos correspondientes a los pares ordenados de intervalo medio aceptado y número de vehículos que ingresan durante ese intervalo. La pendiente de

la recta de regresión es la estimación del tiempo de seguimiento (t_f), ya que representa el tiempo que agrega el paso de un vehículo más, en el ejemplo 2,8594s. Por su parte el intervalo crítico de aceptación se calcula como la ordenada al origen (t_0) más la mitad del tiempo de seguimiento, ya que con menos de ese valor no entra ningún vehículo, en el ejemplo 5,26s ($3,8331s + 2,8594s/2$).

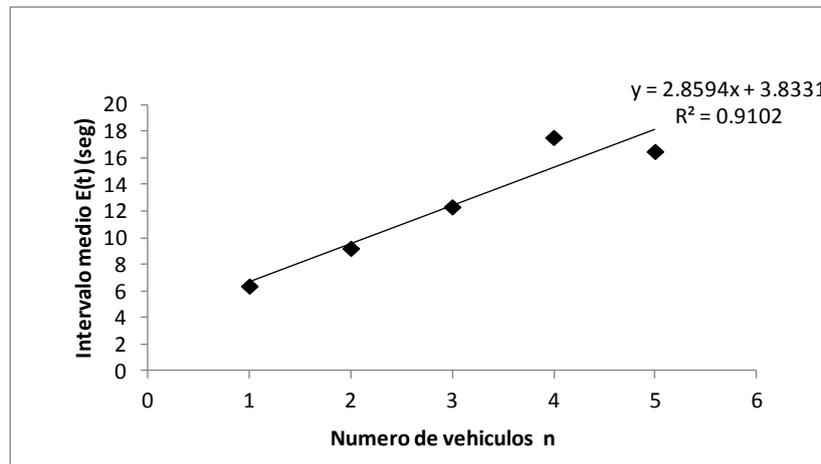


Figura 2. Regresión entre el tamaño del intervalos medio y el número de vehículos

Estudios de intervalos críticos (Galarraga et al, 2002) en cinco intersecciones de la ciudad mediante el método de máxima verosimilitud arrojaron valores de intervalos inferiores a los propuestos por el manual para todos los movimientos de la secundaria. En todos los casos reportados de estudios locales se observaron diferencias significativas (en menos) con los valores propuestos en el HCM2010.

Otro ejemplo que involucra estudios de campo en una intersección de tres ramas (Depiante, 2011) en donde se estimaron intervalos críticos y de seguimiento para giro a la izquierda desde la calle secundaria, obteniéndose para el intervalo critico mediante el método de máxima verosimilitud un valor de $t_c = 4.77 \pm 1.35$ s (con 308 datos) y para el tiempo de seguimiento un valor de $t_f = 2.80 \pm 0.86$ s (con 225 datos) valores estos ambos inferiores a los propuestos en el HCM2010 en un 25% y 20% respectivamente.

Empleando estos últimos valores en los modelos de capacidad expuestos en el mismo trabajo se obtienen las Ecuaciones 13 (Harders/HCM2010) y 14 (Siegloch/NHCRP2007).

$$c_{p,x} = v_{c,x} \frac{e^{-0.001325v_{c,x}}}{1 - e^{-0.000778v_{c,x}}} \quad (13)$$

$$c_{p,x} = 1286e^{-0.000936v_{c,x}} \quad (14)$$

donde:

$v_{c,x}$: es el volumen conflictivo (prioritario) para el movimiento "x", en vph.

$c_{p,x}$: es la capacidad potencial del movimiento "x" de la secundaria, en vph.

Los resultados obtenidos (muy similares) pueden apreciarse en la Figura 3 donde además se muestra la comparación con la formulación del HCM2010 con la cual las capacidades obtenidas resultan considerablemente menores.

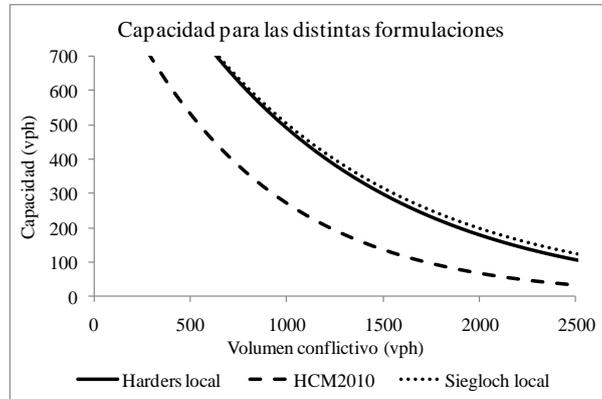


Figura 3: Comparación de formulaciones de Harders y Sieglöch para valores de intervalos locales y HCM2010 para sus valores base

La medición de la capacidad en campo mediante el relevamiento de tasas de descarga durante los períodos en donde existieron colas para diferentes flujos conflictivos comparadas con curva de capacidad propuesta por el HCM2010 también arroja diferencias como puede apreciarse la Figura 4 (Depiante, 2011).

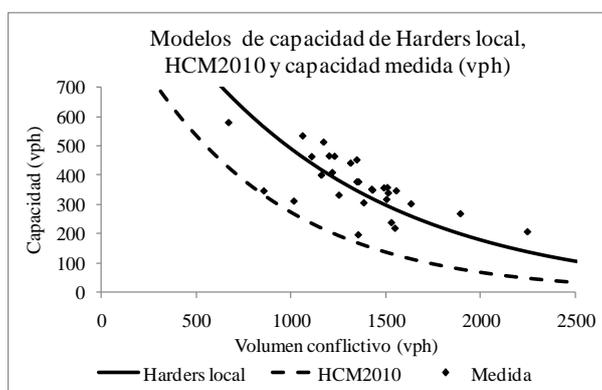


Figura 4: Capacidades modeladas y medidas

Puede observarse la tendencia de disminución de la capacidad con el aumento del flujo conflictivo, con la mayor parte de los datos disponibles observados entre 1000 y 1500vph. Las capacidades obtenidas de la aplicación de la metodología del HCM2010 sin correcciones que reflejen el comportamiento de los conductores locales arrojan valores inferiores a los efectivamente medidos. Las estimaciones de capacidad según los modelos teóricos utilizados permiten afirmar que los ajustes locales en los intervalos críticos y de seguimiento reflejan mejor las capacidades medidas. La Figura 4 resume los resultados obtenidos para los modelos y los valores encontrados de capacidad en campo.

Para un volumen conflictivo de 1500 vehículos por hora (Depiante, 2011) la capacidad de la secundaria para el giro a la izquierda de una intersección en T, con la fórmula que propone el HCM2010 en dos etapas es de 256 vehículos por hora y con las correcciones propuestas se eleva a 345 vehículos por hora, lo que representa un incremento del orden del 35%.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES PARA EL USO DEL HCM 2010

De los trabajos relacionados con el análisis de capacidad de intersecciones no semaforizadas la mayoría considera como parámetro clave en el análisis de capacidad la determinación del valor del intervalo crítico (tiempo mínimo necesario entre los vehículos de la corriente principal para el ingreso de un vehículo de la calle secundaria); como así también el intervalo de seguimiento (intervalo entre vehículos en cola sobre la secundaria que ingresan en un mismo intervalo crítico de la corriente conflictiva o principal). Estos valores son los que mejor representan la influencia del comportamiento de los conductores en las condiciones del tráfico (Weinert, A., 1999).

Es importante notar que los valores de intervalos críticos por sí solos no son importantes sino en la medida en que son utilizados en las ecuaciones de determinación de capacidad y demora en la intersección. Dada la influencia que tienen en la determinación de la capacidad recomendable disponer de dichos valores en la localización considerada. Claramente los valores que se proponen en el HCM2010 resultan en capacidades inferiores a las locales.

Esta información coincide con la expectativa previa y con la experiencia de este mismo grupo de trabajo en el sentido que los conductores locales son más agresivos que los norteamericanos. Bajo esta perspectiva puede inferirse que las intersecciones funcionarán de manera más eficiente, pero también más peligrosa.

Entonces, para estimar capacidades con la metodología del HCM2010 es necesaria la corrección local de intervalos críticos y de seguimiento. El aumento de capacidad para las condiciones locales (debido a la reducción del intervalo crítico y de seguimiento) produce un impacto porcentual cada vez mayor a medida que el flujo conflictivo aumenta. Si bien las curvas tienden a acercarse la diferencia porcentual es mayor.

Es así que como conclusión del análisis de los estudios realizados se proponen valores de intervalos críticos y de seguimiento inferiores a los que propone el HCM2010. Los correspondientes valores se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Comparación de los intervalos críticos y de seguimiento recomendados como locales y propuestos por el HCM2010 para intersecciones en cruz

Movimiento	Intervalo crítico (s) Principal dos carriles		Intervalo crítico (s) Principal cuatro carriles		Tiempo de seguimiento (s)	
	Local	HCM2010	Local	HCM2010	Local	HCM2010
GD	5.0	6.2	5.5	6.9	2.6	3.3
P	6.2	6.5	6.2	6.5	3.4	4
GI	6.7	7.1	7.1	7.5	3.0	3.5

Nota: No se reportan recomendaciones para giros en U (no se dispone de estudios al respecto) ni para giros a la izquierda de la principal (los resultados obtenidos no corresponden a casos en condiciones base), ni tampoco para calles principales de seis carriles (para las cuales no se dispone de datos).

La recomendación es conservadora aun cuando se hayan encontrado valores inferiores. Se recomiendan valores de intervalos críticos inferiores en un 5% para los movimientos de giro a la izquierda y pasantes de la secundaria (respecto de los propuestos en el HCM2010) y valores inferiores en un 20% en al caso de giros a la derecha. En el caso de los tiempos de seguimiento se recomienda el uso de valores inferiores en un 15% para los movimientos de giro a la izquierda y pasantes y valores inferiores en un 20% en al caso de giros a la derecha de la secundaria.

Las relaciones exponenciales de capacidad vs. volúmenes conflictivos para cada movimiento, pueden obtenerse a partir de estos valores mediante el uso de las Ecuaciones 10, 11 y 12. Según ha sido desarrollado previamente los resultados obtenidos son prácticamente iguales y la formulación matemática más sencilla. La Tabla 4 resume los resultados para cada uno de los movimientos. Corresponde consignar que se refiere a capacidad potencial, es decir asumiendo que no hay movimientos de mayor prioridad.

Tabla 4. Relación capacidad volumen conflictivo

Movimiento	Capacidad potencial recomendada (vph)	
	Principal dos carriles	Principal cuatro carriles
GD	$c_{p,GD} = 1385e^{0.001028 v_{c,GD}}$	$c_{p,GI} = 1385e^{0.001167 v_{c,GD}}$
P	$c_{p,P} = 1059e^{0.001250 v_{c,P}}$	$c_{p,GI} = 1059e^{0.001250 v_{c,P}}$
GI	$c_{p,GI} = 1200e^{0.001444 v_{c,GI}}$	$c_{p,GI} = 1200e^{0.001556 v_{c,GI}}$

Finalmente se efectúan algunas consideraciones a tener en cuenta para el caso particular de movimiento de giro a la izquierda en una intersección en tres ramas cuya calle principal presenta dos carriles y cuya calle secundaria sólo uno de acceso a la intersección:

a) Se recomienda una corrección del intervalo crítico $t_{3,LT}$ que propone el HCM2010 en la Ecuación 2 presentada más arriba. Dicho valor de 0.7 se recomienda elevarlo, para condiciones locales, a $t_{3,LT} = 1.5s$.

b) Se recomienda el uso en forma directa de la Ecuación 15 para determinar la capacidad potencial a partir de la determinación del volumen conflictivo.

$$c_{p,GIT} = 1286e^{-0.000936 v_{c,GIT}} \quad (15)$$

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento a la SECYT UNC por el apoyo brindado.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- BRILON, W., WU, N. (2003) - Two-Stage Gap Acceptance: Some Clarifications - Transportation Research Record No. 1852, Traffic Flow Theory and Highway Capacity 2003. p. 26-31 - ISSN: 0361-1981
- BRILON, W., WU, N., KERSTIN L., (1996) - Capacity at Unsignalized Two-Stage Priority Intersections - Published Transportation Research Record 1555 - TRB, National Research Board, Washington, D.C.
- DEPIANTE V., ALBRIEU, L., GALARRAGA J. (2007) – *Influencia del tránsito peatonal en intersecciones urbanas (Córdoba, Argentina)* – Poster XII Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte, Santiago, Chile
- DEPIANTE, V. (2011) - Giros a la izquierda en intersecciones no semaforizadas - Tesis de Maestría en Ciencias de la Ingeniería Mención en Transporte. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- GALARRAGA, J., HERZ M., DEPIANTE V., RUIZ JURI N. (2002) - Intervalos críticos: comportamiento de los conductores y su impacto en la eficiencia y seguridad de las intersecciones no semaforizadas. Diferencias locales con respecto a estudios del HCM 2000. Congreso Provsegur.
- GALARRAGA, J. (2005) Intervalos críticos y de seguimiento, en intersecciones urbanas sin semáforo, para condiciones locales. Anales de la Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, con motivo de haber recibido el Premio Pascual Palazzo en Ingeniería de Transportes
- KYTE, M.; TIAN, Z.; MIR, Z.; HAMEEDMANSOOR, Z.; KITTELSON, W.; VANDEHEY, M.; ROBINSON, B.; BRILON, W.; BONDZIO, L.; WU, N.; TROUTBECK, R. (1996) - Capacity and Level of Service at Unsignalized Intersections - Final Report: Volume 1 – Two Way Stop-Controlled Intersections - National Cooperative Highway Research Program 3-46.
- LUTTINEN, T. (2003) - Capacity at Unsignalized Intersections – TL Consulting Engineers, Ltd. Lahti . TL Research Report No 3. ISBN 952-5415-02-3, ISSN 1458-3313.
- LUTTINEN, T. (2006) - Capacity and Level-of-Service Estimation in Finland – Fifth International Symposium on Highway Capacity and Quality of Service - Yokohama, Japan.
- NCHRP Report 572 (2007) – Roundabouts in the United States – National Cooperative Highway Research Program. TRB of the National Academies.
- RAFF, M. S. y HART, J. W. (1950). A Volume Warrant for Urban Stop Sign. Traffic Engineering and Control , 5/1983, pp.255-258.
- TIAN Z., VANDEHEY M., ROBINSON B., KITTELSON, W., KYTE M., TROUTBECK R., BRILON, W., WU, N. (1999) – *Implementing the maximum likelihood methodology to measure a driver's critical gap* – Transportation Research Part A 33 p 197-197
- TRB (2010). – HCM2010 Highway Capacity Manual – Volume 3: Interrupted Flow – Chapter 19 – Two Way Stop Controlled Intersections - TRB, National Research Council, Washington, D.C.
- TROUTBECK R. (1992) – *Estimating the critical acceptance gap from traffic movements* – Physical Infrastructure Centre Research Report 92-5, Queensland University of Technology, Brisbane Australia
- TROUTBECK, R.; BRILON, W. (1996) - Unsignalized Intersection Theory. Chapter 8 - Página de internet : <http://www.tfhrc.gov/its/tft/chap8.pdf>.
- TROUTBECK R. Y KAKO S. (1999) - Limited Priority merge at unsignalized intersections - TRB A 33 p 291-304
- WEINERT, A. (1999) - *Estimation of Critical Gaps and Follow-Up Times at Rural Unsignalized Intersections in Germany* - Transportation Research Circular E-C018: 4th International Symposium on Highway Capacity- pages 409-421.